INTELLIGENCE ARTIFICIELLE
Apprentissage profond : l'envolée

BIOPHYSIQUE
L'attaque éclair de la crevette-mante

SCIENCE ET SOCIÉTÉ
Cannabis, le retour d'un médicament

POUR LA SCIENCE

Juillet 2016 - n° 465 | www.pourlascience.fr

Édition française de Scientific American

Grotte de Bruniquel

Néandertal a-t-il inventé la culture ?

M 02687 - 465S - F: 6,50 € - RD

BEL : 7,2 € - CAN : 10,95 $ CAD - DOM/S : 7,3 € - Réunion/A : 9,3 € - ITA : 7,2 € - LUX : 7,2 € - MAR : 60 MAD - TOM : 980 XPF - PORT.CONT. : 7,2 € - CH : 12 CHF - TUN/S : 8,4 TND



MUSÉE DE MINÉRALOGIE

MINES ParisTech

venez découvrir l'une des plus belles collections mondiales

Exposition temporaire
du 11 mai au 27 août
« Météorites et leurs impacts»





Horaires d'ouverture
Du mardi au vendredi de 13h30 à 18h
Fin de l'admission 1/2 h avant la fermeture.

Tarifs
Plein tarif 6€
Tarif réduit 3€
(scolaires, étudiants, sans emploi, invalides, retraités)
Gratuit pour les enfants de moins de 12 ans

Visites guidées
Forfait 10/25 personnes 70€ + 3€/pers.
Forfait scolaire 50€
Réservation 2 à 3 semaines à l'avance
Tél : 01 40 51 92 90

Pour venir nous voir





21, 27, 38, 82, 84, 89

Pour nous suivre et nous contacter
musee@mines-paristech.fr
www.musee.mines-paristech.fr
Tél : 01 40 51 91 39
www.facebook.com/pages/Musée-de-minéralogie-Mines-ParistTech



Musée MINES ParisTech
60, Bd Saint-Michel 75006 Paris





8 rue Férou - 75278 Paris Cedex 06

Groupe POUR LA SCIENCE
Directrice des rédactions : Cécile Lestienne

Pour la Science
Rédacteur en chef : Maurice Mashaal
Rédactrice en chef adjointe : Marie-Neige Cordonnier
Rédacteurs : François Savatier, Philippe Ribeau-Gésippe, Guillaume Jacquemont, Sean Bailly
Dossier Pour la Science
Rédacteur en chef adjoint : Loïc Mangin
Développement numérique : Philippe Ribeau-Gésippe, assisté d'Alice Maestratti et William Rowe-Pirra
Directrice artistique : Céline Lapert
Maquette : Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy
Correction et assistance administrative : Anne-Rozenn Jouble
Marketing & diffusion : Laurence Hay et Ophélie Maillet, assistées de Marie Chaudy
Direction financière et direction du personnel : Marc Laumet
Fabrication : Marianne Sigogne et Olivier Lacam
Directrice de la publication et Gérante : Sylvie Marcé
Anciens directeurs de la rédaction :
Françoise Pétry et Philippe Boulanger
Conseiller scientifique : Hervé This
Ont également participé à ce numéro :
Olivier Boucher, Maud Bruguière, Thomas Claverie, Sophie Gallé-Soas, Dominique Mazier, Florian Moreau, Christophe Pichon, Michèle Sebag

PRESSE ET COMMUNICATION
Susan Mackie
susan.mackie@pourlascience.fr - 01 55 42 85 05
PUBLICITÉ France
Directeur de la Publicité : Jean-François Guillotin (jf.guillotin@pourlascience.fr)
Tél. : 01 55 42 84 28 • Fax : 01 43 25 18 29
ABONNEMENTS
Abonnement en ligne : http://boutique.pourlascience.fr
Courriel : pourlascience@abopress.fr
Téléphone : 03 67 07 98 17
Adresse postale : Service des abonnements - Pour la Science, 19 rue de l'Industrie, BP 90053, 67402 Illkirch Cedex
Tarifs d'abonnement 1 an - 12 numéros
France métropolitaine : 59 euros - Europe : 71 euros
Reste du monde : 85,25 euros

COMMANDES DE LIVRES OU DE MAGAZINES
Pour la Science,
628 avenue du Grain d'Or, 41350 Vineuil
pourlasciencevpc@daudin.fr • Tél. : 02 18 54 12 64
DIFFUSION
Contact kiosques : À Juste Titres ; Benjamin Boutonnet
Tel : 04 88 15 12 41
Information/modification de service/réassort :
www.direct-editeurs.fr

SCIENTIFIC AMERICAN Editor in chief : Mariette DiChristina. Executive editor : Fred Guterl. Design director : Michael Mrak. Managing editor : Ricky Rusting. Senior editors : Mark Fischetti, Seth Fletcher, Christine Gorman, Michael Moyer, Clara Moskowitz, Gary Stix, Kate Wong.
President : Dean Sanderson. Executive Vice President : Michael Florek.





Maurice Mashaal
rédacteur en chef

Spéléonéandertaliens

Grotesques, les Néandertaliens ? Oui et non. Oui si l'on prend cet adjectif dans son sens étymologique. Non si l'on adopte l'acception courante du mot. Rappelons que les « grotesques » désignaient des ornements un peu fantaisistes que l'on a découverts à la Renaissance dans des ruines antiques enfouies sous terre et évoquant des grottes.

Quel est le rapport avec les Néandertaliens, ces cousins de *Homo sapiens* qui vivaient en Europe et qui ont disparu il y a environ 40 000 ans ? En mai dernier, une équipe dirigée par Jacques Jaubert, préhistorien à l'université de Bordeaux, publiait une découverte sensationnelle : au fin fond de la grotte de Bruniquel, dans le sud-ouest de la France, d'étranges constructions, réalisées avec des morceaux de stalagmites, datent d'environ 180 000 ans !

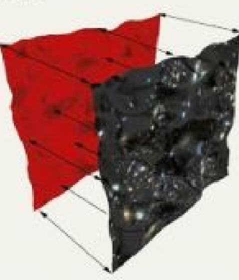
Des humains peut-être archaïques, mais bien loin d'être frustes

La découverte, que nous relate Jacques Jaubert *(voir pages 26 à 35)*, est sensationnelle pour plusieurs raisons. Avec un tel âge, très supérieur à celui des œuvres de Lascaux et d'autres grottes ornées (moins de 40 000 ans), les auteurs des constructions ne pouvaient être que des Néandertaliens – et encore, des Néandertaliens plutôt archaïques. Les trouvailles de la grotte de Bruniquel montrent que ces humains maîtrisaient le milieu souterrain, même dans l'obscurité totale, où ils pouvaient rester et s'éclairer plusieurs heures d'affilée. Elles montrent aussi que les Néandertaliens étaient assez curieux et intrépides pour s'aventurer dans un milieu difficile et dangereux. Et qu'en s'enfonçant de plus de 300 mètres pour disposer en cercles plus de 2 tonnes de stalagmites, ils s'adonnaient à une activité qui ne répondait sans doute pas à des besoins immédiats.

On est ainsi de plus en plus loin de l'image grotesque qui avait été donnée à l'homme de Néandertal. Encore une leçon d'humilité pour *Homo sapiens*, l'« homme moderne »... ■

sommaire

Actualités





Retrouvez plus d'actualités sur www.pourlascience.fr

Réflexions & débats

Ce numéro comporte deux encarts d'abonnement Pour la Science brochés sur la totalité du tirage.
En couverture : © Jean-François Podevin

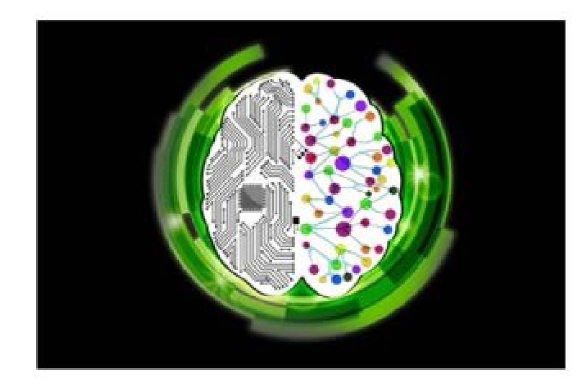
À LA UNE



Il y a environ 180 000 ans, à plus de 300 mètres au fond d'une grotte, des humains ont construit d'énigmatiques structures. Leur sens nous échappe encore, mais elles prouvent indiscutablement la complexité de la culture néandertalienne.

Bonne nouvelle : en Europe comme en Amérique du Nord, la biodiversité locale augmente. Mauvaise nouvelle : à l'échelle de la planète, la biodiversité continue de s'éroder. Tel est le paradoxe du pigeon ramier mis en lumière par les écologues.

Reconnaître un visage, compléter une phrase, gagner au jeu de go... Après plusieurs décennies de déconvenues, les machines intelligentes deviennent enfin réalité – grâce à des réseaux de plusieurs couches de neurones artificiels.







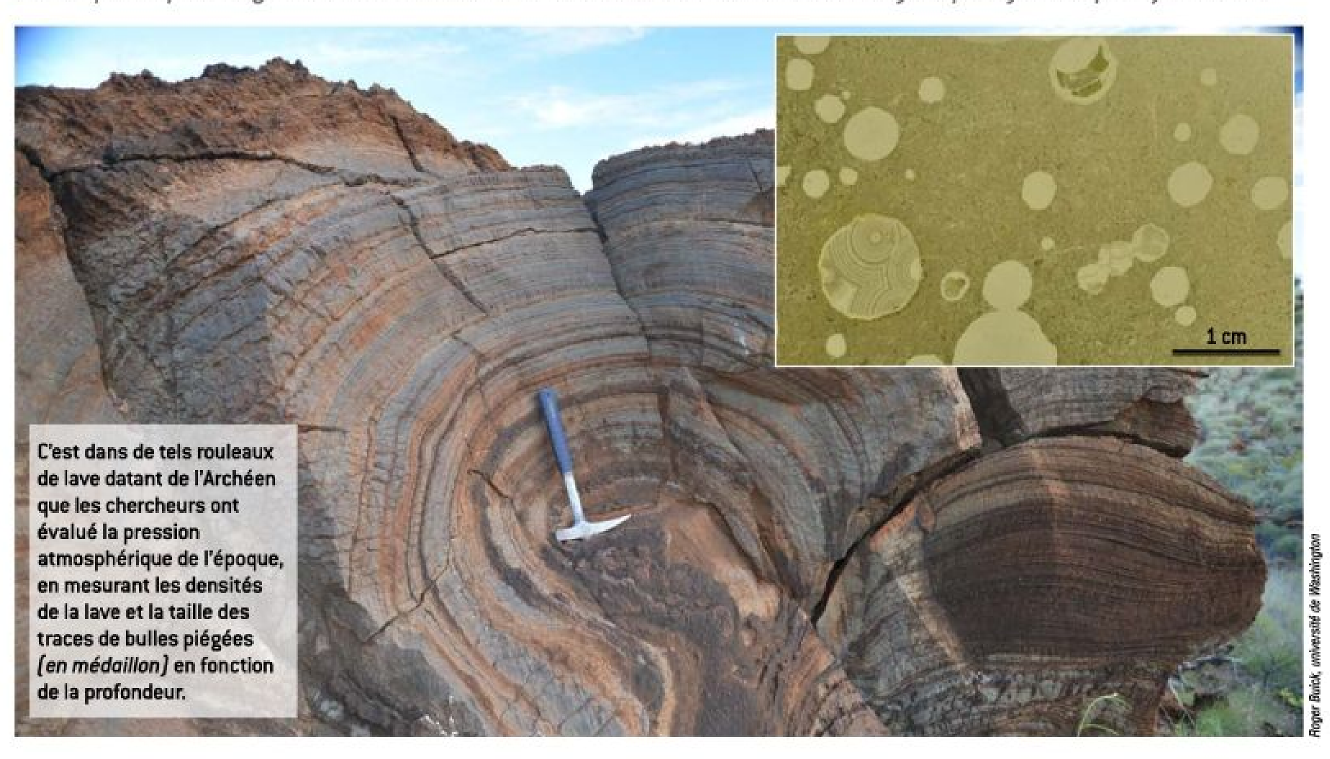
Rendez-vous



Paléoclimatologie

Une faible pression atmosphérique à l'Archéen

Des vestiges de bulles emprisonnées dans une lave ancienne ont livré une approximation de la pression atmosphérique d'il y a 2,74 milliards d'années : elle était au moins deux fois plus faible qu'aujourd'hui.



C'est dans de tels rouleaux de lave datant de l'Archéen que les chercheurs ont évalué la pression atmosphérique de l'époque, en mesurant les densités de la lave et la taille des traces de bulles piégées *(en médaillon)* en fonction de la profondeur.

Roger Buick, université de Washington

Il y a 2,4 milliards d'années, la Terre a subi une « grande oxydation » de l'atmosphère, c'est-à-dire un fort enrichissement en oxygène. Auparavant, à l'Archéen, c'est-à-dire au cours de la période débutant il y a 3,8 milliards d'années et s'achevant il y a 2,5 milliards d'années, l'atmosphère aurait été essentiellement un mélange d'azote, de dioxyde de carbone et de méthane, que l'on pensait aussi dense que l'atmosphère oxygénée actuelle. Faux ! Avec des collègues, Sanjoy Som, de la Nasa, vient d'établir qu'il y a 2,74 milliards d'années, la pression atmosphérique était inférieure à 0,5 bar (contre environ 1 bar aujourd'hui).

Sanjoy Som se consacre depuis longtemps à l'étude de l'atmosphère du lointain passé. Pour ce faire, il recherche systématiquement des paléobaromètres, c'est-à-dire des enregistrements de phénomènes naturels grâce auxquels il est possible d'inférer la pression atmosphérique.

Déjà en 2012, avec une autre équipe, Sanjoy Som était parvenu à exploiter la taille maximale des petits cratères laissés par les impacts de gouttes de pluie sur un tuf sud-africain pour montrer qu'il y a 2,7 milliards d'années, la pression atmosphérique maximale était probablement comprise entre 0,52 et 1,1 bar.

« Probablement », parce que pour obtenir ce résultat, Sanjoy Som avait eu besoin de s'appuyer sur des hypothèses raisonnables concernant l'atmosphère de l'ère archéenne. L'une de ces hypothèses consistait à la supposer composée de 70 % d'azote et de 30 % de dioxyde de carbone…

Avec son équipe actuelle, il vient d'exploiter un nouveau paléobaromètre : des impressions de bulles de gaz volcanique conservées depuis 2,74 milliards d'années dans d'anciennes laves. Les chercheurs ont découvert les restes de ces épanchements basaltiques au sein du craton de Pilbara, en Australie, un très ancien fragment de croûte terrestre.

Lors d'une éruption volcanique archéenne, un flot de lave a incorporé des bulles de gaz volcanique. Tandis que les bulles proches de la surface se trouvaient presque à la pression atmosphérique, celles enfouies en profondeur subissaient en plus la pression hydrostatique. La lave s'étant solidifiée, ces bulles sont restées en place, puis se sont remplies de minéraux avec le temps, laissant des traces rondes.

Or un calcul simple fondé sur la loi des gaz parfaits permet de relier la pression atmosphérique au volume des bulles situées à diverses profondeurs dans la lave. Pour utiliser cette relation, les chercheurs ont soigneusement sélectionné trois lames de lave formées en plein « air » archéen et contenant des impressions de bulles sur deux plans de profondeurs différentes.

Après avoir scanné par tomodensitométrie aux rayons X ces lames par tranches pour y mesurer des centaines d'impressions de bulles, ils ont inféré statistiquement le volume d'une bulle moyenne en bas et en haut des trois lames de laves. La mesure des densités de la lave a alors livré trois valeurs

proches de la pression atmosphérique archéenne, à des incertitudes près qui dépendent de celles entachant le volume moyen d'une bulle, l'épaisseur des lames de lave et les densités de la lave dans chaque lame. À ces incertitudes près, que les chercheurs évaluent à 0,23 bar, les trois résultats obtenus sont proches de 0,23 bar. On peut donc en conclure que la pression atmosphérique était inférieure à la moitié de la pression atmosphérique actuelle.

Ainsi, contrairement à ce que l'on pensait, l'atmosphère archéenne était ténue, ce qui remet à l'ordre du jour une énigme que l'on croyait résolue: le «paradoxe du Soleil faible». À l'Archéen, notre astre était en effet moins brillant qu'aujourd'hui, de sorte que la Terre aurait dû être froide et glacée, donc foncièrement inhabitable si, du moins, l'atmosphère avait contenu les mêmes gaz qu'aujourd'hui et dans les mêmes proportions. Or de nombreux indices suggèrent au contraire que son climat était assez clément pour que l'eau y soit liquide. On expliquait ce paradoxe en invoquant un effet de serre particulièrement renforcé par la pression partielle élevée de l'azote atmosphérique. Cette explication ne tient plus.

Une autre possibilité serait par exemple que la concentration en méthane dans l'atmosphère archéenne ait été bien plus importante qu'aujourd'hui – sachant que le méthane est un gaz dont l'effet de serre, c'est-à-dire son pouvoir de réchauffement, est environ 25 fois supérieur à celui du dioxyde de carbone. Une nouvelle enquête commence.

François Savatier

S. Som et al., Nature Geoscience, vol. 9, pp. 448-451, 2016

Médecine

Paludisme : un espoir pour l'atovaquone

La lutte contre le paludisme se heurte à l'apparition de nouvelles résistances aux traitements médicamenteux. L'antipaludique atovaquone ne fait pas exception, mais l'équipe de Christopher Goodman, de l'université de Melbourne, a découvert que les parasites résistants à ce composé ne survivent pas à leur passage dans le moustique. Pour Jérôme Clain, de l'université Paris-Descartes et travaillant avec le Centre national de référence du paludisme et l'Institut de recherche pour le développement, il s'agit d'une excellente nouvelle.

Comment est utilisé l'atovaquone aujourd'hui ?

Jérôme Clain : L'atovaquone inhibe le complexe bc1, un élément clé de la chaîne respiratoire mitochondriale du parasite *Plasmodium falciparum*, le principal responsable du paludisme. La combinaison de cette molécule avec un autre antipaludique, le proguanil, agit à la fois sur les formes hépatiques et sanguines du parasite chez l'homme et est utilisée en préventif comme en curatif. Bien qu'elle existe sous forme générique depuis deux ans, elle reste d'un prix élevé, qui la réserve surtout aux voyageurs occidentaux. Son utilisation est aussi limitée par l'apparition fréquente de résistances à l'atovaquone au cours du traitement curatif.

Comment ces résistances deviennent-elles fatales au parasite ?

J. C. : Les *P. falciparum* résistants à l'atovaquone prélevés chez des patients lors d'un échec thérapeutique présentent tous une mutation sur un acide aminé spécifique du cytochrome b, une sous-unité du complexe bc1, qui empêche l'atovaquone de l'inhiber. Mais cette mutation diminue aussi l'activité du parasite. Ce n'est pas rédhibitoire à son développement dans le corps humain, mais cela lui est fatal lorsqu'il se trouve dans le moustique, où la chaîne respiratoire est très sollicitée. Les chercheurs ont montré, avec cinq lignées parasitaires résistantes obtenues en laboratoire issues de *Plasmodium* spécifiques de l'homme et de la souris, qu'aucune ne se transmettait durablement *via* le moustique. La résistance ne se transmettrait ainsi que difficilement d'un individu à un autre...



Jérôme Clain, université Paris-Descartes

Avec quelles précautions doit-on accueillir ces résultats ?

J. C. : Des études sur le terrain doivent compléter ces travaux. Ici, les *P. falciparum* résistants ont été obtenus en laboratoire à partir d'une seule lignée parasitaire, alors que la difficulté dans la prise en charge du paludisme réside justement dans la grande variabilité génétique des parasites. De plus, ils présentent bien des mutations du cytochrome b, mais non identiques à celles des parasites des malades. Néanmoins, les essais conduits chez la souris avec des parasites présentant la mutation du même acide aminé sont prometteurs. Par ailleurs, il faut aussi prendre en compte la variabilité des vecteurs : l'étude sur le parasite humain a été réalisée sur la principale espèce de moustique impliquée dans le paludisme, *Anopheles gambiae*, mais des dizaines d'autres peuvent le véhiculer. Enfin, nous ne sommes pas à l'abri de résistances à l'atovaquone qui se développeraient en dehors du cytochrome b et qui seraient alors transmissibles.

Ces travaux vont-ils améliorer la prise en charge du paludisme ?

J. C. : L'Organisation mondiale de la santé n'a jamais poussé à l'utilisation massive de l'atovaquone contre le paludisme en zone d'endémie, en raison de son prix, et surtout du risque de dissémination rapide de résistances. Si l'absence de transmission des parasites résistants se confirme, l'atovaquone-proguanil pourrait compléter l'arsenal thérapeutique contre le paludisme. Une véritable bouffée d'oxygène, à l'heure où l'émergence de souches résistantes à l'artémisinine, l'antipaludique le plus efficace actuellement, nous inquiète beaucoup !

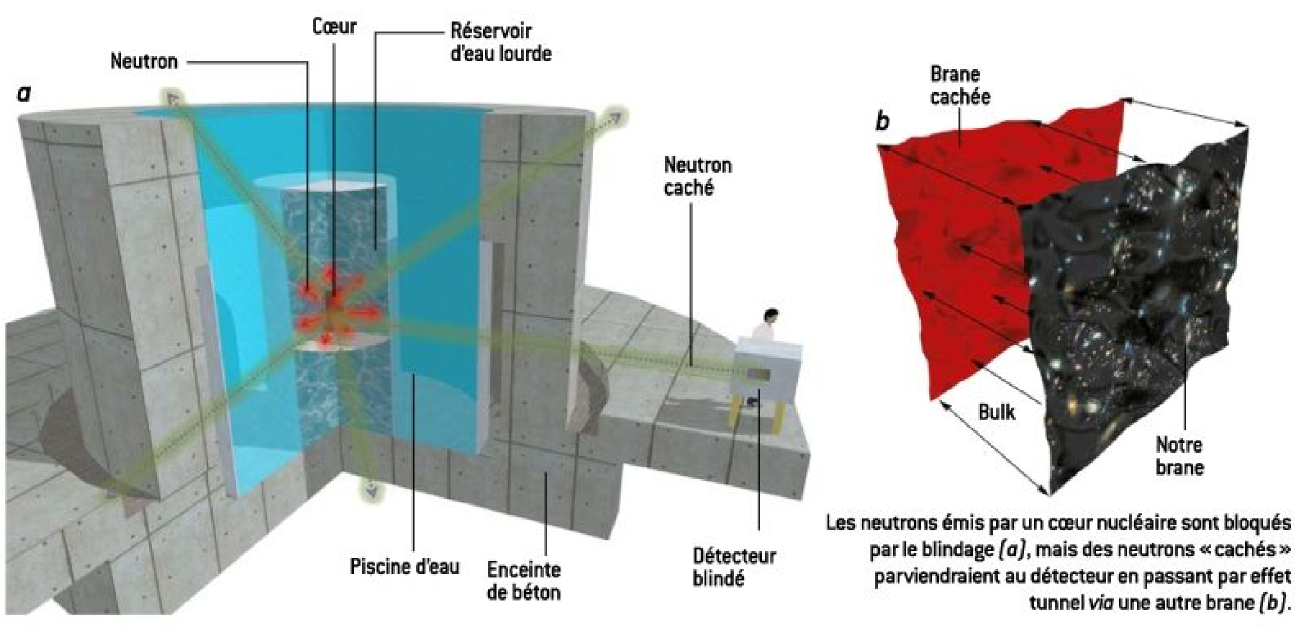
Martin Tiano

Science, vol. 352, pp. 349-353, 2016

Cosmologie

Des neutrons pour explorer le multivers

Dans le cadre de certaines théories, notre univers pourrait coexister avec d'autres. En évaluant la probabilité que des neutrons passent d'un monde à un autre par effet tunnel, des physiciens ont estimé la distance minimale qui nous sépare d'un tel autre univers.



Les neutrons émis par un cœur nucléaire sont bloqués par le blindage *(a)*, mais des neutrons « cachés » parviendraient au détecteur en passant par effet tunnel *via* une autre brane *(b)*.

(a) Michaël Sarrazin (UNamur) ; (b) Melissa Thomas

Et si l'Univers avait plus de trois dimensions d'espace? Certaines théories le supposent, et l'une des conséquences possibles est que d'autres univers à trois dimensions coexisteraient avec le nôtre. Michaël Sarrazin, de l'université de Namur, Guillaume Pignol, de l'université Grenoble-Alpes, et leurs collègues ont testé la possibilité que des neutrons passent de notre univers à un autre de ces mondes. L'expérience a eu lieu auprès d'un réacteur nucléaire de l'institut Laue-Langevin, à Grenoble.

L'idée des dimensions supplémentaires est née dans les années 1920 avec les travaux du mathématicien Theodor Kaluza et du physicien Oskar Klein, qui ont proposé l'existence d'une cinquième dimension. Elle serait enroulée sur elle-même en une boucle si petite qu'elle ne nous est pas perceptible. Les dimensions supplémentaires ont trouvé un nouvel essor avec la théorie des cordes, dont une version est décrite avec un espace-temps à dix dimensions.

En 1990, Joe Polchinski a remarqué que les cordes ne sont pas les seuls objets décrits par cette théorie: il a introduit la notion de *p*-branes, ou « membranes de dimension *p* ». Cette idée a conduit à de nombreux scénarios en cosmologie. L'univers dans lequel nous vivons serait une 3-brane dont nous percevons les trois dimensions d'espace. Cette 3-brane serait plongée dans un espace de dimensionnalité supérieure, le *bulk*, où se trouvent d'autres 3-branes.

Est-il possible de tester la présence d'autres mondes branaires? Dans la plupart des scénarios, la matière est confinée sur sa 3-brane et seuls les gravitons (les particules hypothétiques qui véhiculent l'interaction gravitationnelle) voyagent dans le *bulk*. Cependant, une particule de notre univers pourrait « sauter » dans une autre 3-brane par effet tunnel.

Cet effet quantique est d'autant plus probable que l'autre monde est proche du nôtre. Il faut comprendre « proche » dans le *bulk*, c'est-à-dire dans les dimensions supplémentaires autres que les trois que nous percevons. Ainsi, ce monde pourrait être à moins de 1 millimètre du nôtre et nous serait néanmoins inaccessible!

Michaël Sarrazin, Guillaume Pignol et leurs collègues ont estimé une limite supérieure à la probabilité qu'un neutron traverse le *bulk* par effet tunnel en mesurant le flux de neutrons qui s'échappent éventuellement d'un réacteur nucléaire. En principe, tous les neutrons sont bloqués par le blindage du réacteur et aucun n'atteint le détecteur placé à l'extérieur. Mais certains éviteraient le blindage en passant par effet tunnel dans une autre brane et en revenant de la même façon à proximité du détecteur.

Le flux mesuré étant nul, les chercheurs en ont déduit, dans un modèle simple supposant deux mondes branaires aux propriétés identiques, que la distance minimale entre les deux 3-branes est supérieure à 87 fois la longueur de Planck, soit environ... $1{,}4 \times 10^{-33}$ mètre.

Sean Bailly

Phys. Lett. B, vol. 758, pp. 14-17, 2016



*Dans le modèle dit ADD, c'est la taille maximale des dimensions supplémentaires, en postulant qu'il en existe deux de plus que celles que nous percevons.**

* Source : http://pdglive.lbl.gov/Particle.action?node=S071

Paléontologie

Un cœur que l'évolution a simplifié

L'évolution du vivant ne s'effectue pas toujours dans le sens d'une complexité croissante. L'étude de la structure du cœur d'un poisson à nageoires rayonnées, menée par l'équipe de José Xavier-Neto, du laboratoire brésilien de biologie de Campinas, l'illustre.

Ces chercheurs ont étudié une soixantaine de fossiles de *Rhacolepis buccalis*, un poisson datant d'une période chaude du Crétacé, il y a quelque 119 millions d'années. Dans deux d'entre eux, l'équipe brésilienne a découvert un cœur fossilisé.



Ce fossile de *Rhacolepis buccalis* provient de la formation géologique de Santana, du bassin de Araripe, au Brésil. Ce site est célèbre pour la très bonne conservation en trois dimensions de ses fossiles.

Pour aller plus loin, les chercheurs ont fait appel au synchrotron européen de Grenoble, l'ESRF, où des physiciens les ont aidés à scanner l'intérieur des cœurs avec des rayons X de très grande énergie. Les images obtenues, d'une résolution de 6 micromètres, sont surtout très contrastées, ce qui est précieux pour distinguer les tissus.

Ces images ont révélé avec netteté un cône artériel (partie reliant le ventricule aux artères) comportant cinq rangées de valves, alors que le cœur de la plupart des poissons actuels n'en présente qu'une.

Comment interpréter cette observation ? Comme *Rhacolepis buccalis*, les poissons à nageoires rayonnées – qui représentent plus de 99,8 % des poissons actuels – sont des actinoptérygiens. *Polypterus*, un actinoptérygien basal (situé à la base du groupe des actinoptérygiens), avait neuf rangées de valves dans son cœur. *Rhacolepis buccalis* n'en a que cinq. Certains actinoptérygiens primitifs, tels que les tarpons, en ont deux. Les autres membres actuels du groupe n'en ont qu'une, tandis que leur cône artériel a pratiquement disparu pour être réduit à la forme d'un bulbe. Ce faisceau d'indices suggère qu'au cours de l'évolution, une simplification du dispositif d'éjection du sang dans les branchies s'est produite en plusieurs étapes, donc de façon graduelle.

F. S.

eLife, vol. 5, e14698, 2016

Dr Fluide and Mr Solide

Le mélange d'eau et de Maïzena a des propriétés étonnantes. Il se comporte comme un liquide mais devient très dur lorsqu'une violente « pression » est exercée dessus : on peut marcher sur une piscine remplie de ce mélange. Il appartient ainsi à la famille des fluides dits non newtoniens.

Les physiciens en comprennent le comportement macroscopique, mais n'étaient pas d'accord sur le mécanisme en jeu à l'échelle microscopique. Deux modèles étaient avancés, mais aucun ne s'accordait parfaitement avec les expériences. John Royer, de l'institut américain NIST, et ses collègues ont résolu le conflit.

Avec un colloïde constitué de microbilles de silice baignant dans un mélange d'eau et de glycérol, les chercheurs ont montré que le comportement liquide-solide du système est contrôlé par le frottement entre les billes, mais qu'à faible concentration, l'expulsion du fluide entre les billes joue aussi un rôle important. Ainsi, ces deux processus agissent de concert.

Climatologie

Gaz de schiste : une pollution insidieuse

Bruno Franco, du Groupe infrarouge de physique atmosphérique et solaire (GIRPAS) à Liège, a mesuré l'évolution de la quantité d'éthane dans l'atmosphère depuis le milieu des années 1980. Les résultats mettent en évidence un changement de tendance intriguant. Alors que sa concentration diminuait d'environ 1 % par an, elle réaugmente depuis 2009, à raison de 5 % par an. Avec Emmanuel Mahieu, responsable du GIRPAS, il a cherché à comprendre cette inversion de tendance en contactant leurs collègues du réseau NDACC (*Network for the Detection of Atmospheric Composition Change*). Ces derniers font la même constatation, les plus fortes croissances étant observées au Colorado et à Toronto, à proximité de nombreuses zones d'exploitation de gaz de schiste. Les forages américains sont-ils responsables de cette augmentation considérable ?

L'extraction du gaz de schiste par fracturation hydraulique libère des hydrocarbures, dont du méthane et de l'éthane, dans un rapport plus ou moins constant. Afin de quantifier les émissions d'éthane dues à cette activité, les chercheurs ont donc comparé les flux de méthane, détectables depuis l'espace, avec une carte de la répartition des puits d'extraction aux États-Unis. D'après les résultats, cette industrie aurait conduit à l'augmentation de 75 % des émissions d'éthane en provenance d'Amérique du Nord. Les chercheurs ont aussi pu déduire que l'exploitation du gaz de schiste aux États-Unis représente 10 % des émissions annuelles globales de méthane d'origine humaine.

Cette industrie a certes réduit les émissions de CO_2, mais elle contribue à l'augmentation des émissions de méthane, dont l'effet de serre est environ 25 fois plus puissant que celui du CO_2.

Alice Maestracci

B. Franco et al., Environmental Research Letters, vol. 11(4), 044010, 2016



L'extraction des gaz de schiste se fait grâce à des derricks de forage. Cette activité libère d'importantes quantités de méthane et d'éthane dans l'atmosphère.

Biophysique

Nager efficacement **par succion**

Les méduses sont les nageurs les plus efficaces des océans. L'étude des effets hydrodynamiques créés par leurs délicates contractions permet de comprendre pourquoi.

L'été revient, la mer se réchauffe et les méduses en profitent... Vingt-quatre heures sur 24, 7 jours sur 7, ces organismes diaphanes nagent à la recherche de nourriture, effectuant parfois des périples de plusieurs kilomètres par jour. Les méduses nagent plus efficacement que tout autre animal : elles consomment moins d'énergie, en proportion de leur taille, que des dauphins ou des requins. « Leur déplacement a un coût en oxygène inférieur de 48 % à celui de n'importe quel autre animal nageur », précise Bradford Gemmell, biologiste marin à l'université de la Floride du Sud. En étudiant l'espèce *Aurelia aurita* (la méduse commune, dont la taille va jusqu'à 40 centimètres), lui et trois autres chercheurs, dont John Dabiri, professeur d'ingénierie à l'université de Stanford, ont récemment montré que la méduse réalise cet exploit en créant autour de son corps des zones de haute et basse pression qui à la fois l'aspirent et la poussent en avant, la succion jouant un rôle crucial.

Dans un récipient d'eau où nageait une méduse, Bradford Gemmell et ses collègues ont ajouté de minuscules billes de verre. En illuminant les billes à l'aide de lasers et en filmant leurs mouvements avec une caméra rapide, ils ont pu visualiser les vitesses et calculer les pressions du fluide autour de la méduse.

On constate que la contraction de la cloche de l'animal crée du côté convexe du dôme un tourbillon annulaire de basse pression. En même temps, une région de haute pression se forme sous l'animal. La méduse est ainsi propulsée à la fois par succion et par poussée.

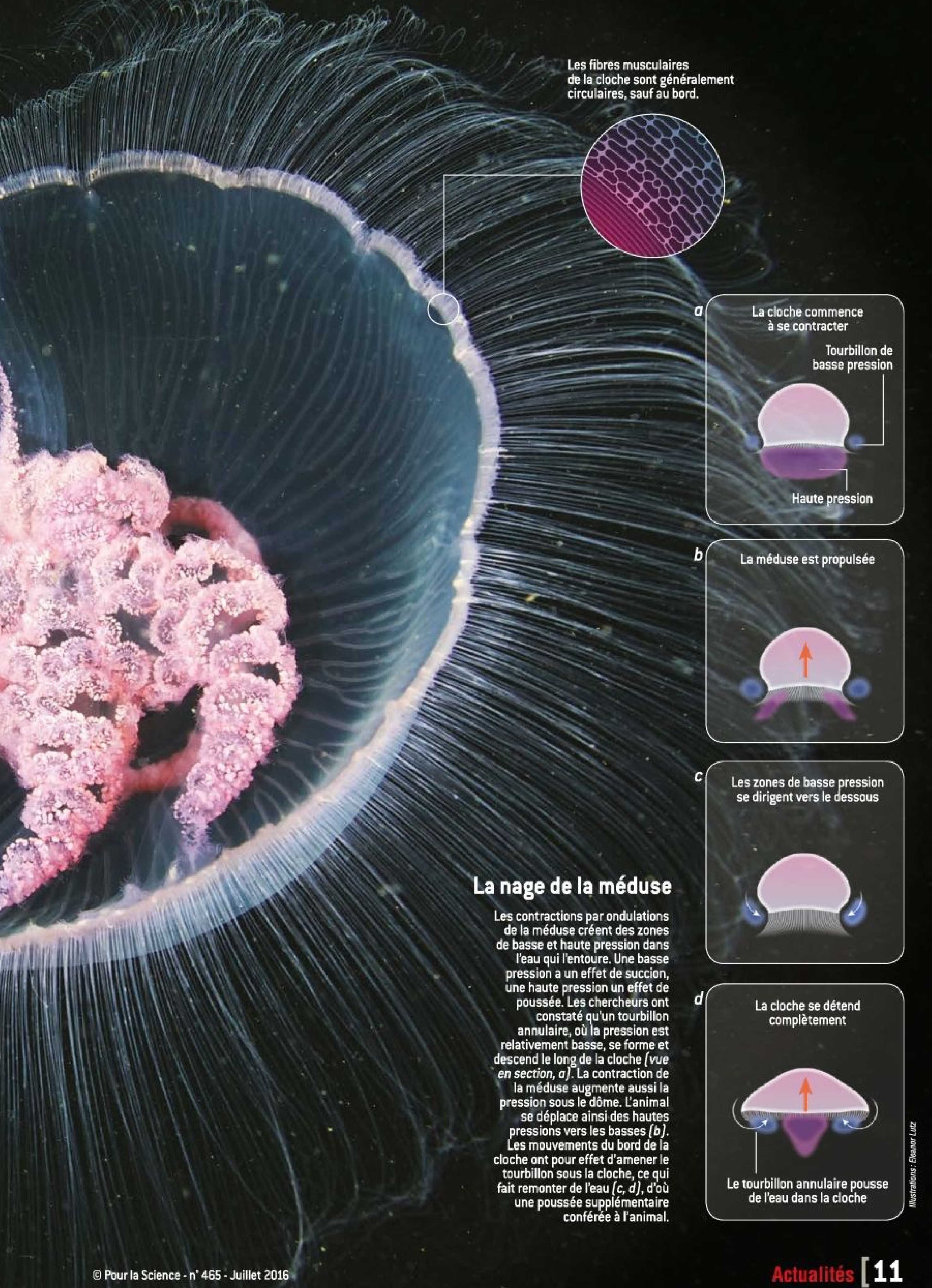
Les chercheurs ont eu la surprise de voir que quand la méduse détend le bord de sa cloche, le tourbillon annulaire descend sous l'animal, ce qui a pour effet de faire remonter de l'eau sous pression à l'intérieur de la cloche. « Cela donne à la méduse une seconde poussée », explique Bradford Gemmell. Le bord de la cloche effectue les mouvements appropriés grâce à des muscles mis en évidence récemment et qui diffèrent des fibres musculaires circulaires dont est muni le reste de la cloche.

Bradford Gemmell et ses collègues ont également mis en évidence ces principes de nage par succion chez un autre bon nageur, la lamproie. Des principes dont l'ingénierie pourrait s'inspirer *(voir http://bit.ly/1Y8uZs3)*.

Josh Fischman

B. J. Gemmell et al., Nature Communications, vol. 6, article 8790, 2015

© Alexander Semenov



La nage de la méduse

Les contractions par ondulations de la méduse créent des zones de basse et haute pression dans l'eau qui l'entoure. Une basse pression a un effet de succion, une haute pression un effet de poussée. Les chercheurs ont constaté qu'un tourbillon annulaire, où la pression est relativement basse, se forme et descend le long de la cloche *(vue en section, a)*. La contraction de la méduse augmente aussi la pression sous le dôme. L'animal se déplace ainsi des hautes pressions vers les basses *(b)*. Les mouvements du bord de la cloche ont pour effet d'amener le tourbillon sous la cloche, ce qui fait remonter de l'eau *(c, d)*, d'où une poussée supplémentaire conférée à l'animal.

Le trou noir souffle

Certaines galaxies, bien qu'ayant tous les ingrédients nécessaires, ne forment pas de nouvelles étoiles. Edmond Cheung, de l'université de Tokyo, et ses collègues ont résolu ce mystère. Le trou noir supermassif au centre de ces galaxies émet un vent interstellaire intense qui chauffe les nuages moléculaires de la galaxie. Ces derniers, du fait de l'agitation thermique, ne peuvent pas s'effondrer sur eux-mêmes, ce qui empêche la formation de nouvelles étoiles.

Une molécule de l'oubli

Près de 10 % d'entre nous souffrirons dans notre vie d'un stress post-traumatique, incapables d'oublier la peur associée à un événement traumatisant. Une équipe de l'université du Texas a montré qu'une hormone de la graisse, l'adiponectine, suffit à « éteindre » la peur. Des souris « normales » conditionnées à une situation traumatisante finissent par oublier leur peur en quelques jours, contrairement à celles génétiquement modifiées pour ne plus produire l'adiponectine. Mais une injection de cette hormone suffit à « libérer » ces dernières de la peur. D'où un traitement potentiel, pour lequel un brevet est déjà déposé.

La jonquille face au vent

Exposées au vent, certaines structures allongées, telles des tours ou des antennes, vibrent, ce qui peut les endommager. Woojin Kim, de l'université coréenne de Séoul, et ses collègues ont trouvé l'inspiration dans la nature pour limiter les effets du vent qui, dans le sillage, crée des tourbillons (et donc des vibrations) et une importante traînée. Ils ont remarqué que la jonquille a une tige de section elliptique et torsadée. En optimisant les paramètres de cette structure, ils ont pu réduire de 18 % la traînée et supprimer les vibrations.

Environnement

La fragmentation des plastiques révisée



© Olenalavrova/Shutterstock.com

Les modèles prévoyaient plus de microplastiques que l'expédition n'en a collecté. Roulant dans les vagues, ces petits déchets se fragmenteraient plus vite que les gros.

Alexandra ter Halle, de l'université Paul-Sabatier à Toulouse, et ses collègues ont rejoint l'« Expédition 7e Continent » pour étudier la fragmentation des déchets plastiques dans les océans en prenant en compte leur taille, mais aussi leur masse. Les 1 100 débris prélevés dans le gyre de l'Atlantique Nord montrent une grande disparité. Les plus grands (entre 5 et 55 millimètres) sont peu nombreux, mais constituent 67 % de la masse totale; quant aux microplastiques (moins de 5 millimètres), ils représentent 33 % de la masse totale. Pourtant, un modèle de fragmentation uniforme de l'échantillon prévoit une masse totale 20 fois supérieure à celle observée pour les microplastiques. Comment expliquer ce déficit de particules légères?

En mer, les plastiques ont des comportements distincts selon leur taille. Les plus gros ont une face exposée à la lumière, craquelée et terne, et une face submergée qui abrite des microorganismes. Ils se fragmentent en petits débris cubiques qui ont tendance à rouler dans les vagues, ce qui empêche les microorganismes de s'y fixer.

Une étude complémentaire dirigée par Julien Gigault, du CNRS, montre que ce roulement favorise leur érosion par les coins et donne naissance à des nanoparticules. Ce nouveau modèle de fragmentation explique le déficit de particules légères: les petits débris se fragmentent plus vite.

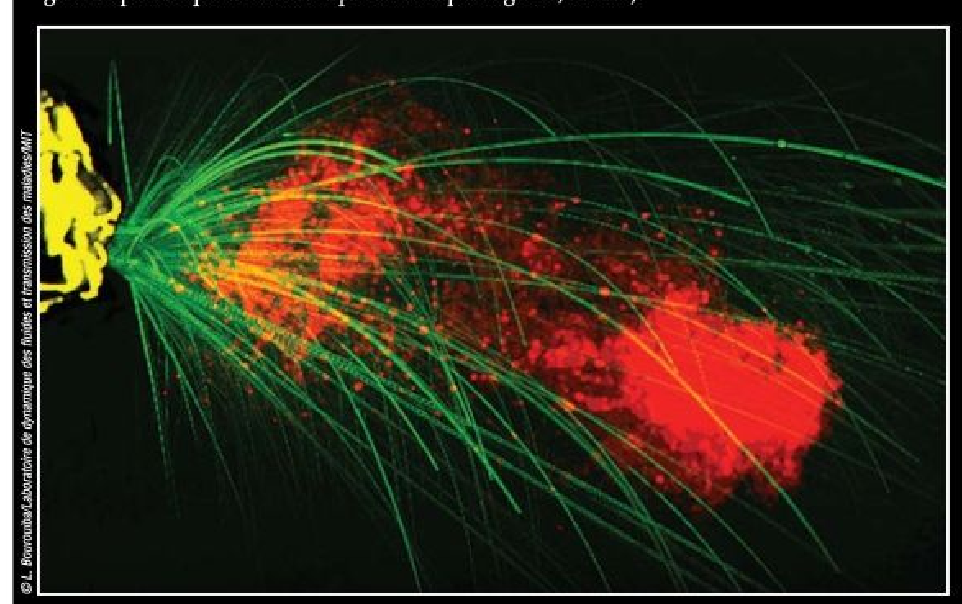
A. M.

Env. Sci. & Techn., vol. 50(11), pp. 5668-5675, 2016; Env. Sci.: Nano, vol. 3, pp. 346-350, 2016

Insolite

Autopsie de l'éternuement

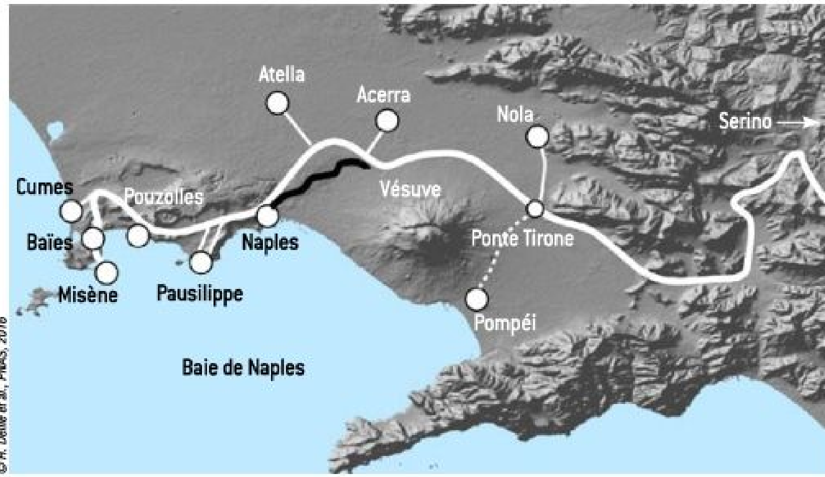
Pour comprendre comment les maladies se propagent, Lydia Bourouiba et ses collègues, du MIT, aux États-Unis, ont filmé avec une caméra à haute vitesse des personnes qui éternuent. Le phénomène est difficile à modéliser, notamment parce qu'il est turbulent et parce qu'il comprend plusieurs phases (un nuage de fines gouttelettes, *en rouge*, et des gouttes plus importantes transportant les pathogènes, *en vert*).



© L. Bourouiba/Laboratoire de dynamique des fluides et transmission des maladies/MIT

Archéologie


© Peter Schüle



© H. Delile et al., PNAS, 2016

L'histoire de Naples révélée par la pollution au plomb

Des dépôts de plomb dans les sédiments du port antique de Naples témoignent d'un important développement de son réseau hydraulique jusqu'au VIe siècle.

Une équipe internationale de géochimistes et d'archéologues vient de lever le voile sur un volet important de l'histoire de Naples : l'impact de l'éruption volcanique du Vésuve, en 79, sur l'aqueduc de la baie napolitaine, l'Aqua Augusta.

Construit entre 27 et 10 avant notre ère et long d'environ 140 kilomètres, cet aqueduc approvisionnait en eau une dizaine de cités et plusieurs villas de la baie de Naples. L'éruption du Vésuve en 79 de notre ère a ravagé une région plus vaste que la seule ville de Pompéi, mais son impact sur l'aqueduc restait mal connu.

C'est dans le cadre de la construction d'une nouvelle ligne de métro à Naples que des fouilles archéologiques ont été organisées. Hugo Delile, de la Maison de l'Orient et de la Méditerranée à Lyon, et ses collègues ont étudié des couches de sédiments du bassin portuaire antique de la ville. Ils y ont découvert une importante quantité de plomb. Composées de ce même métal, les canalisations de l'aqueduc polluaient l'eau transportée, laissant des traces dans les sédiments du bassin. Leur étude permet donc de comprendre le sort de l'aqueduc.

Pour distinguer le plomb dit naturel, contenu dans le réseau cristallin des minéraux, de celui adsorbé sur les vases portuaires et provenant de la pollution de l'eau par l'aqueduc, les chercheurs ont baigné les échantillons dans une solution liquide afin d'isoler le plomb anthropique « collé » sur les sédiments. Ils ont ensuite mesuré les ratios des différents isotopes de plomb dans les extraits obtenus.

La composition isotopique du plomb anthropique, importé, change drastiquement une quinzaine d'années après l'éruption du Vésuve, événement repéré dans les stratigraphies portuaires grâce à un dépôt de pierres ponces typique de cette catastrophe. Cela signifie que les tuyaux ont été remplacés à la suite de cet événement et que le plomb utilisé était issu d'autres districts miniers romains que ceux ayant servi à construire le système.

Au-delà de cette révélation, c'est le développement urbain de Naples jusqu'au VIe siècle qui est mis en lumière grâce à cette étude. L'évolution de la composition des isotopes du plomb dans les sédiments échantillonnés montre que le réseau de distribution de l'eau s'est progressivement étendu jusqu'au début du Ve siècle. Puis la proportion du plomb importé baisse par rapport à celle du plomb naturel dans les couches supérieures. Ce phénomène coïncide avec des événements clés de l'histoire de la région : les invasions barbares des Wisigoths de 410 à 412 et celles des Vandales entre 455 et 463, ainsi que les éruptions volcaniques de la fin du Ve siècle. Ces événements ont probablement endommagé le système hydraulique de Naples.

L'équipe souhaite appliquer l'analyse du plomb à d'autres vestiges antiques. « Elle permet de mieux comprendre l'impact des activités humaines sur l'environnement », explique Hugo Delile, « mais la pollution n'a pas la même signification au cours du temps : elle peut témoigner de la prospérité d'une société comme de son déclin et c'est cette cyclicité qui m'intéresse et qui, sur le long terme, a beaucoup à nous apprendre. »

William Rowe-Pirra

PNAS, vol. 113, pp. 6148-6153, 2016

L'aqueduc Aqua Augusta, long de 140 kilomètres, prenait sa source à Serino et approvisionnait les cités de la baie de Naples *(ci-dessus à droite)*. L'eau acheminée était stockée dans des citernes telles que la *Piscina mirabilis*, située à Misène *(à gauche)*.

Chimie

Plus d'aérosols dans le passé

Les aérosols refroidissent l'atmosphère en réfléchissant la lumière du Soleil, mais la chimie qui conduit à leur formation reste à préciser. Les aérosols primaires proviennent de poussière des déserts, de sels marins ou de la suie de combustion, tandis que les aérosols secondaires se forment à partir de composés chimiques gazeux qui s'agrègent en particules solides.

Les chercheurs pensaient que la formation des aérosols secondaires nécessitait de l'acide sulfurique, qui dérive du dioxyde de soufre. Or ce dernier provient surtout de la combustion des énergies fossiles durant l'ère industrielle. Les membres de l'expérience CLOUD, au Cern, près de Genève, ont montré que certaines molécules émises par les arbres peuvent conduire à la formation d'aérosols. Il y aurait ainsi eu plus d'aérosols dans le passé qu'on ne le pensait.

S. B.

J. Kirkby et al., Nature, vol. 533, pp. 521-526, 2016

Virologie

La ruse des contrôleurs du VIH

Les «contrôleurs du VIH», capables de résister naturellement au virus de l'immunodéficience humaine (VIH), responsable du sida, représentent seulement 0,5 % des personnes infectées. Lisa Chakrabarti, de l'institut Pasteur à Paris, et ses collègues ont montré qu'un récepteur T particulier, présent à la surface des cellules immunitaires, les lymphocytes T CD4+, contribuerait à cette résistance. Par sa haute affinité avec un antigène originaire de la capside du virus, le peptide Gag293, ce récepteur permet aux lymphocytes T CD4+ de mieux reconnaître les cellules infectées et de déclencher une réponse immunitaire. Les contrôleurs disposent ainsi d'une réserve de cellules immunitaires mémoires capables d'entraîner une réponse antivirale efficace. Grâce à ce mécanisme, ils empêchent la réplication du VIH et maintiennent un taux de virus très bas dans le sang. Cette découverte ouvre de nouvelles perspectives dans la recherche d'un vaccin ou d'une immunothérapie. Une application en thérapie cellulaire, consistant à transférer des lymphocytes T CD4+ modifiés avec une séquence du récepteur des contrôleurs aux patients sous traitement, est envisagée.

W. R.-P.

D. Benati et al., J. Clin. Invest., vol. 126, pp. 2093-2108, 2016

Neurosciences

Comment apprend-on la nuit ?

Après une bonne nuit de sommeil, vous connaissez par cœur le poème que vous ne maîtrisiez pas la veille… De nombreuses études ont ainsi montré que le cerveau «rejoue» la nuit ce qu'il a appris la journée afin de consolider les souvenirs. Quel est le mécanisme en jeu ?

L'hippocampe est la structure au centre du cerveau où les souvenirs sont initialement formés. Mais plusieurs théories supposent que pour former des «traces» mnésiques durables, l'hippocampe échange des informations avec le cortex cérébral. Et ce transfert aurait lieu durant le sommeil. Restait à le prouver.

Pour ce faire, Michaël Zugaro et ses collègues, du Centre interdisciplinaire de recherche en biologie à Paris, ont enregistré l'activité électrique de l'hippocampe et du cortex préfrontal médian de rats au cours de leur sommeil. Quand l'hippocampe émettait des ondulations, le cortex réagissait environ 140 millisecondes après par des ondes dites delta et des trains d'impulsions nommés fuseaux du sommeil. Les chercheurs ont ensuite entraîné les ron à mémoriser l'emplacement de deux objets identiques dans une boîte. Quand les animaux y restaient 20 minutes, ils se souvenaient des objets le lendemain, et, durant leur sommeil, présentaient un «dialogue électrique» entre hippocampe et cortex bien plus important que celui des rongeurs restés 3 minutes dans la boîte, lesquels ne se souvenaient de rien. Si, en revanche, on faisait apparaître dans le cortex de ces derniers, pendant leur sommeil, des ondes delta et des fuseaux du sommeil, les rats mémorisaient les objets.

Favoriser le dialogue de l'hippocampe et du cortex la nuit augmente donc la mémorisation. Cependant, le chemin est encore long avant de vous aider à mémoriser votre poème… En attendant, le meilleur moyen reste de bien dormir.

Bénédicte Salthun-Lassalle

N. Maingret et al., Nature Neuroscience, en ligne le 16 mai 2016



© Shutterstock.com/ HieroGraphic

Des chercheurs viennent de découvrir comment deux structures du cerveau « dialoguent » la nuit pour mémoriser des informations.

Des cellules solaires autoréparatrices

Les cellules photovoltaïques en pérovskite, une alternative prometteuse à celles en silicium du fait de leur moindre coût, perdent de leur efficacité si elles sont trop exposées au soleil. Elles auraient cependant des capacités autorégénératrices. La baisse de rendement s'explique par le piégeage des électrons dans la structure cristalline de la pérovskite. Claudine Katan, du CNRS, et ses collègues ont découvert qu'une minute dans l'obscurité totale ou l'exposition à de basses températures permettent de rétablir un courant optimal.

Une maladie tropicale en Corse

En 2013, plus de 100 personnes s'étant baignées dans la rivière corse Cavu ont été contaminées par la bilharziose – une maladie due à un ver hématophage du genre *Schistosoma* et qui sévit surtout en Afrique et dans d'autres régions tropicales. Une équipe de médecins, chercheurs et vétérinaires a mené une véritable enquête pour déterminer l'origine du parasite. Jérôme Boissier et ses collègues ont établi que le ver provenait du nord du Sénégal et résultait d'un croisement entre un parasite de l'homme et un parasite des ruminants. Cette hybridation lui aurait conféré des capacités d'adaptation à un climat tempéré.



POINT DE VUE

Pour une finance (réellement) éthique

La finance dite éthique ne le sera pas vraiment tant qu'elle restreindra sa démarche aux choix d'investissement. Si les acteurs du secteur ne s'interrogent pas sur l'éthique du système financier lui-même, moraliser la finance restera un vœu pieux.

Christian WALTER

En septembre 2015, « Éthique et partage », l'un des premiers fonds français d'investissement socialement responsable (c'est-à-dire qui appliquent des principes du développement durable aux placements financiers), a annoncé qu'il excluait dorénavant les énergies fossiles de son portefeuille d'actions. La décision est louable, mais le rend-elle plus éthique pour autant ? Pas sûr.

Aujourd'hui, lorsqu'on parle de finance éthique, on pense immédiatement à la finance solidaire ou aux investissements « socialement responsables » (ISR), c'est-à-dire des formes d'épargne visant à financer des activités socialement utiles. Cette démarche se traduit en général par des critères d'exclusion dans les choix d'investissement : on exclut tel ou tel secteur d'activité (les énergies fossiles, le tabac, l'alcool etc.). On pourrait résumer cet objectif par la question : « Où va mon argent ? » Cette « autre » finance se propose de répondre à une urgence éthique : construire un système économique et financier qui soit plus juste et davantage soucieux d'un bien commun. Plus fondamentalement, ce qu'appelle cette autre finance, c'est une refondation des principes directeurs de la finance dite traditionnelle. À plus long terme, son objectif est aussi de révéler les limites des fondements de la théorie financière.

Pourtant, à écouter la plupart des acteurs professionnels – gérants de fonds de partage, investisseurs solidaires, etc. – qui œuvrent concrètement dans le champ de la finance « autre », cette nouvelle finance plafonnerait sans parvenir à passer à une échelle supérieure : seuls 6 milliards d'euros ont été placés en France en 2014 sur des produits solidaires, contre 3 000 milliards placés en gestion traditionnelle. Quelque chose bloquerait son développement. Malgré des travaux théoriques de grande qualité qui présentent les principes de cette finance « autre », les acteurs professionnels peinent à en trouver les causes.

Les modèles de mathématiques financières appellent à exister des « choses » qui n'existeraient pas sans eux

Et si la limitation actuelle de la démarche de la finance solidaire ne venait pas de son objectif théorique de rupture avec la logique de la finance classique, parfaitement assumé et argumenté, mais de l'oubli pratique, par les professionnels, d'une composante essentielle de la finance classique : les structures techniques du système financier ? Par structures, j'entends les outillages techniques (logiciels de gestion et systèmes de calculs de risque) et mentaux (modèles de gestion, mathématiques financières, etc.) qui sont partout présents dans les pratiques professionnelles. Si l'on veut une finance réellement éthique, ces savoirs et ces techniques doivent aussi faire l'objet d'une investigation éthique, c'est-à-dire être analysés de la même manière que les choix d'investissement. N'y aurait-il pas aussi des outils techniques ou des modèles mathématiques à exclure des choix que l'on fait lorsqu'on gère des fonds de partage ? Ce critère d'exclusion des outils nécessite d'entrer dans la logique interne des modèles mathématiques et du savoir financier. Il relève pour cela de ce qu'on nomme l'éthique épistémique, c'est-à-dire de l'éthique liée au savoir. Aujourd'hui, l'éthique de la finance se limite à l'éthique déontologique et oublie l'éthique épistémique.

Or celle-ci est indispensable. Pourquoi ? Parce que la technique financière (un logiciel de gestion de portefeuille, par exemple) n'est pas seulement un outil qui serait neutre du point de vue des valeurs qu'il véhicule. On croit souvent que c'est l'usage qu'on fait d'un outil qui conditionne la qualité éthique de l'action. Cette conception, qui peut être juste dans le cas d'un marteau (planter un clou c'est « bien », frapper son voisin c'est « mal »), est complètement fausse dans le cas de la finance. Car les outils de gestion financière, loin d'être uniquement des aides à la prise de décisions (fussent-elles inspirées par des valeurs respectables), apparaissent bien davantage comme des transmetteurs de représentations scientifiques élaborées par la théorie financière, représentations

pouvant inclure des modélisations mathématiques très abstraites.

Par exemple, élaborer un modèle de risque de crédit ne signifie pas juste entreprendre une description des risques que prennent les banques lorsqu'elles octroient un crédit, mais construire un objet théorique qui va modifier les pratiques du risque de crédit. C'est en ce sens que, aujourd'hui, les sociologues des sciences et en particulier ceux qui étudient la finance s'accordent à considérer que les modèles de mathématiques financières « fabriquent » la finance concrète. Il n'y a pas de « réalité financière » au sens où la planète Mars existe même si l'on ne braque pas un télescope dans sa direction. Les modèles de mathématiques financières ne produisent pas une *prédiction* mais une *prédication*. Ils appellent à exister des « choses » qui n'existeraient pas sans eux. C'est ce qu'on nomme leur performativité. Or pour l'heure, les acteurs de la finance éthique ne prennent pas en compte ce phénomène.



APPARU AU DÉBUT DES ANNÉES 1980, le concept de finance éthique se réfère en général à trois critères, tous autres que financiers : l'attitude des entreprises vis-à-vis de leurs salariés, leur attitude vis-à-vis de tous leurs partenaires et leur respect de l'environnement. Les fonds d'investissement dits éthiques ne se positionnent que sur des entreprises rassemblant ces trois critères, en négligeant les aspects éthiques des instruments de gestion.

Le *credo* caché de la finance

La théorie financière et les mathématiques du risque façonnent progressivement le monde social à leur image. Ces effets sociétaux poussent à s'interroger sur l'arrière-plan théorique des représentations scientifiques de la finance : quel est le *credo* caché – le *logos* – de ces représentations ? Cette question est le domaine de l'éthique épistémique. Donnons un exemple concret de la manière dont le *logos* financier agit par performativité d'un modèle.

Les décisions d'investissement des gérants de portefeuille se répartissent en général en trois niveaux : une décision dite de stratégie (qui consiste à choisir une grande répartition, par exemple 50 % investis en actions et 50 % investis en obligations) ; des décisions dites tactiques (qui consistent à prendre des positions en s'écartant de la stratégie, par exemple 40 % en actions et 60 % en obligations) ; et enfin les choix de titres : dans les 40 % d'actions, quelles sociétés choisir ? Cette tripartition des décisions ne tombe pas du ciel : elle a été pensée en ces termes dans les années 1960 par des universitaires américains pour optimiser et « scientificiser » la gestion des portefeuilles et représente un coup de force intellectuel.

Avant, on ne procédait pas ainsi : gérer des placements revenait à choisir des sociétés dont on pensait qu'elles produiraient des rendements réguliers. Les modèles « scientifiques » de choix de portefeuilles ont donc produit une modification profonde des pratiques de gestion. En d'autres termes, une représentation mentale particulière a transformé le monde de l'investissement. Fallait-il installer cette représentation dans les pratiques professionnelles ? N'y aurait-il pas eu une « autre » manière de gérer des portefeuilles ?

En 1952, deux représentations mentales existaient. L'une était celle d'Harry Markowitz, prix Nobel d'économie en 1990, pour qui le risque se résumait à une variation symétrique de la rentabilité autour de sa moyenne (la volatilité). Dans cette représentation, on montrait qu'une diversification maximale des actifs permettrait de réduire la volatilité. On supposait que, par la magie de la loi des grands nombres, le risque diminuerait. Ce qui nécessitait une conception très précise (et qui s'est révélée très fausse) de l'incertitude. L'autre représentation, imaginée par l'économiste américain Arthur Roy,

■ L'AUTEUR


Christian WALTER est actuaire agrégé et titulaire de la chaire Éthique et finance du Collège d'études mondiales de la fondation Maison des sciences de l'homme, à Paris.

■ SUR LE WEB

Chance & Finance
Le blog de Christian Walter, rassemblant ses carnets de recherche : http://epistemofinance.hypotheses.org/

JustFinance
Carnet bilingue de la chaire Éthique et finance : http://finethics.hypotheses.org/



Un label solidaire

Créé en 1997, le label Finansol vise à distinguer les produits d'épargne solidaire – soutenant l'accès à l'emploi et au logement, le développement durable, l'entrepreneuriat dans les pays en développement... – des autres produits d'épargne accessibles au grand public. L'idée est d'assurer aux épargnants que leur placement contribue au financement d'activités solidaires. Cette démarche reste-t-elle éthique quand ce financement utilise les outils de gestion issus de la finance classique ?

s'intéressait davantage à la perte maximale probable, donc aux « individus » statistiques et non aux moyennes. C'est la conception de Markowitz qui a prévalu, entraînant à sa suite toute l'histoire de la gestion des portefeuilles, très largement formatée par la mesure de la performance des gérants professionnels, que l'on compare toujours à des moyennes (indices de référence).

Cet exemple montre comment des hypothèses qui se situent très en amont des pratiques financières concrètes ont un effet, d'abord dans la pensée des mathématiciens qui les utilisent dans leurs modèles, puis dans la pratique des professionnels qui les reçoivent. Or dans le cas du fonds « Éthique et partage », les portefeuilles sont gérés avec des outillages techniques et mentaux issus de la représentation de Markowitz. Du point de vue de l'éthique déontologique, tout est parfait : ces fonds visent une autre logique que celle, dominante, de maximisation de la rentabilité à niveau de risque fixé – une logique davantage solidaire. Mais la technique fait norme, et les valeurs de la finance solidaire se trouvent décalées par rapport à celles que transportent les techniques de gestion. En l'oubliant, on parle le langage de l'adversaire : les gérants de la finance éthique cherchent à prouver avec les outils de la finance classique qu'ils sont aussi bons (sinon meilleurs) que les gérants classiques. Hélas, les outils de la finance classique n'ont pas été pensés pour mettre en valeur les principes de la finance éthique et cette démarche ne peut donc aboutir. Le manque d'éthique épistémique devient ici un obstacle à l'éthique déontologique.

Un obstacle réglementaire

Ainsi, on ne résoudra pas le problème moral de la finance en injectant un surcroît de valeurs, fussent-elles éthiques, dans une structure dont les fondements reposent sur d'autres valeurs. La technologie de gestion contient une morale embarquée. On comprend que, pressée par l'urgence, la finance éthique ait commencé par le plus rapide et le plus simple : l'orientation de l'épargne vers des objectifs de type solidaire. Mais il faut maintenant étendre cette démarche aux instruments de gestion eux-mêmes.

Toutefois, un obstacle de taille à cette extension est la régulation financière actuelle. Les pratiques de la finance sont enchâssées dans des normes financières et des réglementations qui reposent sur les principes de la finance classique (optimisation du couple risque-rendement) et imposent les outils de celle-ci (indices de référence, calculs de risque avec probabilités).

Prenons deux exemples récents, l'un à l'échelle macroéconomique, celle de l'organisation des marchés, l'autre à l'échelle microéconomique, celle des compagnies d'assurance. En 2014, la directive 2014/65/UE du Parlement européen, relative aux marchés d'instruments financiers (directive MIF2), a remodelé l'organisation de l'espace boursier européen. Son objectif déclaré est de faire tendre les échanges réels vers une forme « idéale » dont le préambule indique clairement qu'elle doit refléter la théorie financière classique. Cette contrainte réglementaire impose la notion de prix arbitré par une condition sur le couple risque-rendement.

Quant aux compagnies d'assurance, elles ont toujours dû calculer des montants minimums de réserves. Mais la directive 2009/138/CE du Parlement européen, dite Solvabilité II, impose de nouveaux modes de calcul de ces réserves, qui valident la théorie financière de l'arbitrage. On assiste donc à une « naturalisation » de la finance classique *via* les instruments de gestion des risques imposés par les normes financières. En cela, les instruments de calcul et les réglementations impliquent et, peu à peu, réalisent le monde financier imaginé par la théorie financière classique. Calculs et institutions se répondent en écho pour façonner une société qui se financiarise inexorablement dans cette direction.

Tant que la finance dite éthique reste cantonnée à l'éthique déontologique, elle demeure sans effet sur cette structure de financiarisation. De même que l'on parle d'investissements socialement responsables, il serait donc nécessaire que la régulation soit aussi socialement responsable. C'est une question politique. Mais pour le moment, l'avalanche réglementaire consolide et durcit la finance classique. Elle favorise l'optimisation du couple risque-rendement grâce à des critères tels que la calculabilité généralisée du risque par des probabilités et des lois simples des grands nombres. Les grands nombres, les moyennes, au détriment des individus : le contraire de ce que recherche la finance éthique. Il est plus que temps qu'elle complète son approche déontologique par une analyse critique des instruments financiers. ■



■ BIBLIOGRAPHIE

C. Walter, **The financial *Logos* : The framing of financial decision-making by mathematical modelling**, *Research in International Business and Finance*, vol. 37, pp. 597-604, 2016.

B. De Bruin, **Ethics and the Global Financial Crisis. Why Incompetence Is Worse than Greed**, Cambridge University Press, 2015.

T. Lagoarde-Segot, **La finance solidaire. Un humanisme économique**, De Boeck Supérieur, 2014.

F. Muniesa, **The Provoked Economy : Economic Reality and the Performative Turn**, Routledge, 2014.

C. Walter, **Le Modèle de marche au hasard en finance**, Economica, 2013.

CABINET DE CURIOSITÉS SOCIOLOGIQUES par Gérald Bronner



Des histoires trop belles

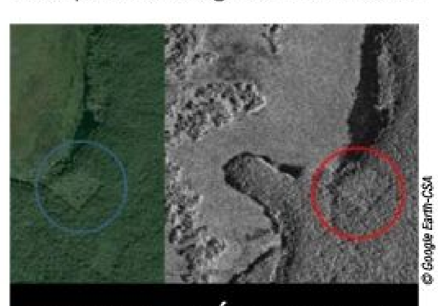
Le Web et les réseaux sociaux fourmillent de récits invérifiés qui, parce qu'ils flattent nos attentes, se répandent très vite. Apprenons à nous en méfier !

En mai dernier, deux histoires ont parallèlement affolé les réseaux sociaux. La première a scandalisé beaucoup d'internautes ; il s'agissait d'une vidéo – vue des centaines de milliers de fois – montrant le contrôle d'un handicapé dans une gare par trois policiers qui laissaient l'homme à terre, ses affaires personnelles éparpillées autour de lui, de même que ses prothèses de jambes. La seconde, plus joyeuse, expliquait qu'un adolescent canadien avait découvert une cité maya inconnue des archéologues en utilisant des images prises par satellite et, accessoirement, une théorie fumeuse fondée sur les constellations.

La première caractéristique de ces deux histoires est qu'elles ont fait le *buzz*. La seconde est qu'elles sont trop belles ou trop moches pour être tout à fait vraies. Concernant la première, après que les acteurs de ce marché cognitif dérégulé qu'est Internet se sont bien indignés du cruel contrôle policier, il s'est avéré que les caméras de vidéosurveillance avaient filmé l'intégralité de la scène, dont il ressortait une tout autre histoire. L'homme handicapé ne s'est pas fait contrôler arbitrairement, mais parce qu'il urinait dans une poubelle. Il s'est alors énervé lorsque les policiers lui ont dressé un procès-verbal et a ôté lui-même ses prothèses, les poussant vers les fonctionnaires.

Savait-il que la fin de la scène filmée par un passant serait favorable à la légende qui allait se propager sur les réseaux ? Il a en tout cas lui-même fait un récit accusateur de la scène, qui a contribué à cette indignation collective et qui a abouti à un dépôt de plainte par les policiers pour « dénonciation calomnieuse ».

La deuxième histoire n'est pas plus crédible que la première, d'après tous les spécialistes des Mayas. Outre qu'elle implique de colossales approximations géographiques et historiques, le lieu désigné comme étant celui de la cité découverte ne serait rien d'autre qu'un ancien champ en jachère.



UNE ANCIENNE CITÉ MAYA découverte par un adolescent, grâce notamment à des images prises par satellite ? Une jolie histoire à raconter, mais qui s'est révélée fausse.

Ces histoires ont disparu aussi vite qu'elles avaient surgi. Pourtant, si elles ne sont pas vraies, elles ont l'intérêt d'être exemplaires. Elles paraissent bien différentes, mais, dans les deux cas, elles mettent en scène un faible contre des puissants. Dans la première histoire, la dissymétrie est évidente. Dans la seconde, c'est parce qu'un adolescent a fait une découverte importante au nez et à la barbe d'une communauté scientifique probablement considérée comme arrogante et enfermée dans ses certitudes. En d'autres termes, ce récit moral sous-jacent qui veut que, dans un conflit, l'on donne raison au faible contre le puissant a contribué à la viralité des récits et correspond à ce que le logicien britannique Bertrand Russell nommait le « sophisme de la vertu supérieure des opprimés ».

Le fait qu'un récit se répande sans que ses promoteurs ne prennent le temps de vérifier leurs informations n'indique rien de sa fausseté. Mais il souligne combien la diffusion d'une histoire sur le marché cognitif dépend d'autres facteurs que de la seule vérité. Il serait intéressant d'établir une cartographie du *buzz*, et l'on montrerait sans doute qu'elle est en partie déterminée par nos attentes morales et descriptives, de sorte que nos esprits sont disponibles à certaines des histoires à venir et pas à d'autres.

Le mieux que nous puissions faire est d'apprendre à nous méfier et de suspendre notre jugement lorsqu'un récit nous plaît ou nous déplaît trop. S'il s'emboîte facilement avec les représentations préalables que nous avons du monde, cela devrait nous mettre en alerte. Mais il reste encore un obstacle pour que nous ne soyons pas la dupe de ces fables. Les colporteurs d'une histoire qui capte l'attention des autres en tirent généralement un bénéfice social ; il faut donc aussi accepter de renoncer à une telle récompense. ■

Gérald BRONNER est professeur de sociologie à l'université Paris-Diderot.

HOMO SAPIENS INFORMATICUS chronique de Gilles Dowek



Admission post-bac : une informatisation opaque

L'informatisation des procédures administratives est parfois nécessaire, mais il est crucial d'éviter certaines erreurs.

Le baccalauréat vient de s'achever et une classe d'âge entière doit désormais s'inscrire dans l'enseignement supérieur. Pour l'y accueillir, le ministère de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche a mis en place un site web qui recueille les vœux des étudiants et les informe de leur admission, ou non, dans les formations souhaitées. Comment s'effectue la sélection ? Cela reste obscur, en particulier pour les filières normalement ouvertes à tout titulaire d'un baccalauréat mais sous tension du fait d'un nombre de candidats dépassant les capacités d'accueil. L'algorithme mis en place opère un « traitement automatisé et critérisé », mais les détails ne sont pas connus du public.

Le flou qui entoure ce site et son algorithme inquiète les étudiants et crée une polémique. Cet exemple illustre les questions éthiques qui se posent et les erreurs qu'il vaut mieux éviter quand on informatise ainsi l'administration.

Avant toute chose, était-il nécessaire d'informatiser le processus d'admission post-bac ? Il est à peu près clair que, pour optimiser l'affectation de quelque 700 000 étudiants dans plus de 10 000 formations, un ordinateur, du fait de sa puissance de calcul, peut trouver une bien meilleure solution qu'un humain, c'est-à-dire une solution plus proche des vœux des étudiants. C'est souvent cette nécessité de traiter de grands volumes de données qui conduit à informatiser l'administration. Et dans le cas de l'orientation post-bac, un ordinateur peut traiter les étudiants plus équitablement qu'un humain, dont les décisions sont malheureusement souvent influencées par l'heure de la journée, la fatigue ou la décision précédente. De ce point de vue, nous aurions tort de nous plaindre de la « déshumanisation » du processus d'orientation des étudiants.

Cependant, la question la plus importante est celle de la transparence de ce processus.



© Jasminko Ibrakovic/Shutterstock.com

L'ORIENTATION POST-BACCALAURÉAT est une étape stressante pour un lycéen, surtout si elle dépend d'un logiciel dont les critères sont tenus secrets.

Nous pouvons admettre que les algorithmes qui pilotent les sous-marins nucléaires soient gardés secrets, mais nous comprenons mal pourquoi ceux qui orientent les étudiants vers les formations de l'enseignement supérieur le sont aussi. De plus, quand une décision qui nous concerne est prise par un algorithme, nous attendons une plus grande transparence que lorsque cette même décision est prise par un être humain. Il était donc prévisible que les étudiants demandent qu'un processus aussi essentiel pour eux soit totalement transparent. Ne pas l'avoir anticipé est une erreur.

Une deuxième erreur concerne la méthode : la seule façon de rendre public un algorithme complexe dans tous ses détails est la publication du code source du logiciel qui l'implémente. Cette mise à disposition est le seul moyen de tester cet algorithme de façon indépendante et d'en vérifier le résultat. C'est aussi la seule façon de s'assurer que l'algorithme respecte bien un certain nombre de valeurs éthiques. Ce code source aurait donc dû être publié dès avant la mise en service du site. Et ce n'est pas la récente publication d'un document de deux pages, non exécutable, qui corrige cette erreur.

La troisième erreur est de ne pas avoir publié la spécification de l'algorithme, c'est-à-dire l'ensemble des propriétés qu'il est censé vérifier. On s'attendrait par exemple qu'il soit rendu public que l'algorithme ne tient pas compte du sexe des étudiants, ou de leur lieu de naissance, dans leur orientation. Mais, à l'instar du code source, cette spécification est gardée secrète.

De telles erreurs en cascade expliquent, même si elles ne la justifient pas, la défiance que nos concitoyens expriment aujourd'hui face au processus d'informatisation de l'administration. Une informatisation cependant ô combien nécessaire, si nous voulons une administration plus efficace et plus juste. ■

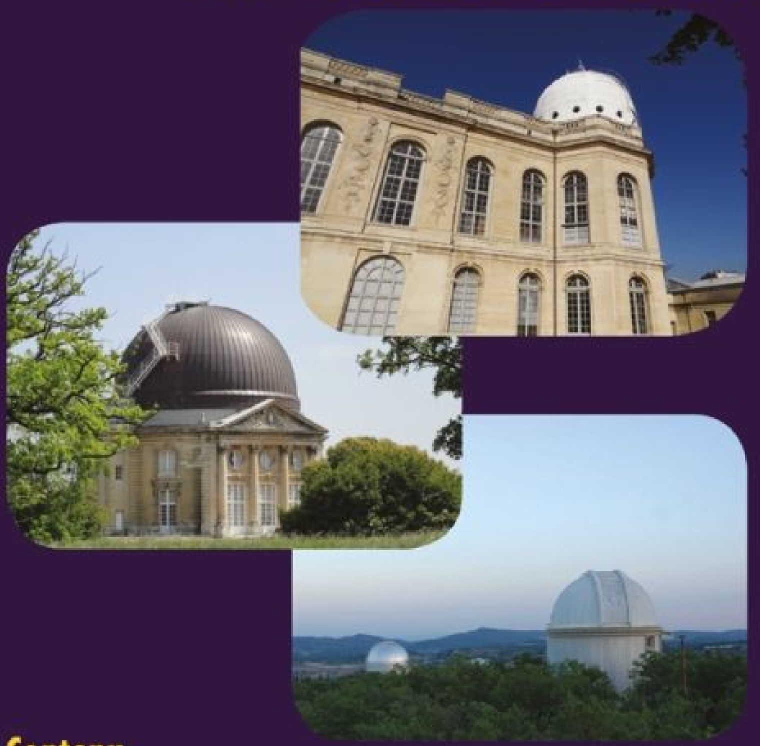
Gilles DOWEK est chercheur à l'Inria et membre du conseil scientifique de la Société informatique de France.

Observatoire de Paris

DIPLÔME D'UNIVERSITÉ

EN PRÉSENTIEL ET À DISTANCE

"EXPLORER ET COMPRENDRE L'UNIVERS"



Objectifs

L'Observatoire de Paris propose la préparation d'un diplôme d'Université permettant d'acquérir un panorama des connaissances actuelles et des recherches en cours en astronomie et en astrophysique auprès d'astronomes professionnels.

Publics concernés

Ces cours s'adressent à toutes les personnes passionnées d'astronomie et de niveau baccalauréat scientifique ou équivalent.
Les étudiants inscrits à l'université dans le cadre du LMD peuvent valider en ECTS sous réserve d'accord avec leur responsable pédagogique.
Possibilité d'inscription dans le cadre de la formation permanente.

Contenu

Cette formation, de niveau L1-L2, peut être suivie en présentiel et à distance sous forme de cours le mardi soir de 17h à 20h à l'Observatoire de Paris ou de cours filmés en différé.
Un stage pratique de traitement de données a lieu en mars à l'Observatoire de Meudon.
Un stage facultatif de 4 nuits d'observation a lieu l'été à l'Observatoire de Haute-Provence.
Les sujets abordés sont les suivants :

- Mécanique céleste et astrométrie
- Histoire de l'astronomie
- Ondes et instruments
- Le soleil
- Planétologie comparée
- Traitement de données
- Etoiles et milieu interstellaire
- Galaxies
- Cosmologie
- Observations

Inscriptions

Dossiers à déposer avant le 15 septembre sur le site d'inscription en ligne :
https://ufe.obspm.fr/candidatures_ufe

Renseignements

http://duop.obspm.fr/-DU-Explorer-et-Comprendre-l-Univers-

contact.duecu@obspm.fr
Téléphone : 01.45.07.78.87



Unité de Formation et d'Enseignement
Observatoire de Paris, 5 place Jules Janssen 92 195 Meudon



Sélectionner les étudiants par tirage au sort ?

par Richard Taillet, sur le blog Signal du bruit

Récemment, le rectorat de Paris a limité la capacité d'accueil en première année d'études médicales (Paces). En conséquence, le nombre de demandes étant supérieur au nombre de places, la sélection des étudiants admis à s'inscrire se fera par un tirage au sort. Certains s'en sont étonnés, d'autres, offusqués.

C'est un problème qui touche toutes les universités, sous une forme ou une autre : dans certaines formations et dans certains établissements, la demande dépasse la capacité d'accueil. C'est notoirement le cas dans les formations médicales, mais aussi dans celles du sport (Staps). Quelles sont les solutions pour y faire face ? À ce jour, trois approches sont envisagées.



© Matej Kastelic/Shutterstock.com

Le nombre de demandes d'inscription dans certaines filières universitaires dépasse les capacités d'accueil. Tirer au sort les étudiants est-il pour autant une solution acceptable ?

Première solution : augmenter la capacité d'accueil des formations. C'est elle que semblent préférer les étudiants. Elle présente cependant deux inconvénients majeurs. D'une part, elle coûte cher aux universités, car en pratique cela implique d'embaucher du personnel enseignant, administratif et technique et de construire ou aménager des bâtiments (amphithéâtres, salles de travaux pratiques, etc.). D'autre part, cette approche conditionne l'offre universitaire à la demande. Cela peut sembler positif, mais il y a des risques de dérive : une université implantée dans une région roudoudoudicole ne finirait-elle pas par se spécialiser dans la roudoudoudologie, perdant ainsi sa vocation d'universalité ?

Deuxième solution : sélectionner les étudiants, sur dossier ou par un examen. C'est déjà le cas dans tout un pan de l'enseignement supérieur : classes préparatoires, écoles d'ingénieurs, IUT, etc. Partout, en fait, sauf pour l'entrée en licence universitaire, où le sujet est tabou ! On peut être attaché à l'idée de laisser sa chance à tout le monde, mais pourquoi dans ce cas l'appliquer aux seules licences ? Cela étant, selon moi, on ne rend pas service aux étudiants en permettant à tous d'accéder à n'importe quelle licence à la seule condition d'avoir obtenu le baccalauréat, comme c'est actuellement le cas. Une sélection finit par s'opérer de toute façon, à un niveau ou un autre (par imposition d'un *numerus clausus* en médecine, par exemple). La question ne devrait pas être : faut-il faire ou non une sélection ? Mais : quand et comment la mettre en œuvre ? Rémi Patrice, vice-président de l'Association nationale des étudiants en médecine de France (ANEMF), s'oppose à la sélection sur dossier, mais rappelle qu'en raison des abandons, il y a finalement assez de place pour tout le monde un mois après la rentrée. N'est-ce pas là aussi une forme de sélection ? Et, de toute façon, une université ne peut pas admettre plus d'étudiants que sa capacité d'accueil en comptant sur les abandons de début d'année.

Troisième solution : désigner les étudiants par tirage au sort. Cette solution ne satisfait pas grand monde dans son principe, mais elle a l'avantage d'éviter de prendre position en faveur d'une des deux autres. Elle évite par ailleurs de répondre à une autre question, beaucoup plus profonde : quel est le but de telle ou telle formation universitaire ?

Vous aurez sans doute perçu ma préférence pour la deuxième solution, mais je suis aussi conscient de ses dérives potentielles et je ne sais pas précisément comment la mettre en pratique. C'est en tout cas un problème épineux auquel il est urgent de s'atteler, si l'on ne veut pas voir perdurer la quatrième solution, actuellement en œuvre et que j'ai pris soin de mettre sous le tapis : ne rien faire et laisser la pression monter chez les étudiants et les personnels universitaires. ■



Richard TAILLET est professeur à l'université Savoie-Mont-Blanc et chercheur au Laboratoire d'Annecy-le-Vieux de physique théorique (LAPTh). Il est l'auteur du blog Signal sur bruit (www.scilogs.fr/signal-sur-bruit).



Que faisait Néandertal dans la grotte de Bruniquel ?

Jacques Jaubert

Il y a environ 180 000 ans, à plus de 300 mètres au fond d'une grotte, des humains ont construit d'énigmatiques structures. Leur sens nous échappe encore, mais elles prouvent indiscutablement la complexité de la société néandertalienne.




© Benoît Clarys

Que font ces Néandertaliens sur le pas de leur grotte ? Ils discutent. S'éloigner de l'abri de la grotte est dangereux en effet. Le petit groupe en question vit dans la vallée encaissée de l'Aveyron pendant l'avant-dernière glaciation, le stade isotopique marin 6 (SIM 6) en jargon paléoclimatique. Le climat est rude. Durant cette longue période froide du Pléistocène qui commence il y a quelque 190 000 ans et s'achève vers 128 000 ans avant le présent, des phases de réchauffement rapide alternent, parfois brutalement, avec des phases froides qui couvrent de glace une partie de l'hémisphère Nord. Cela oblige les rares populations néandertaliennes d'Europe à s'adapter très vite : nul doute que, lorsque l'hiver dure six mois et que la température moyenne est négative, ces humains doivent rechercher des abris plus accueillants, même s'ils sont humides comme les entrées de grottes.

Or nous venons d'obtenir la preuve que les premiers Néandertaliens ne se contentaient pas d'y séjourner, mais qu'ils arpentaient aussi les profondeurs des grottes. À Bruniquel, une profonde cavité surmontant le cours encaissé de l'Aveyron, aux confins des actuels départements du Tarn et du Tarn-et-Garonne, nous avons, non sans quelque étonnement, constaté qu'ils avaient des compétences confinant à celle d'un spéléologue actuel : capables de s'éclairer et de se mouvoir durablement en milieu souterrain, ils s'y rendaient en nombre pour se livrer à des activités élaborées et, pour nous, encore énigmatiques.

Comment sommes-nous parvenus à ces découvertes et conclusions, qui renouvellent notre vision des Néandertaliens ? Il nous a fallu pour cela mettre sur pied une équipe rassemblant de nombreuses compétences, car les constats auxquels nous aboutissions étaient déstabilisants. Nous souhaitions donc les établir sur des bases les plus solides possible.

En 150 ans de recherches, notre vision des Néandertaliens a beaucoup changé. Pour s'en rendre compte, il suffit de relire ce que, vers 1921, l'un des premiers paléoanthropologues à avoir étudié le squelette d'un Néandertalien écrivait : « Il faut remarquer que ce groupe humain du Pléistocène moyen, si primitif au point de vue des caractères physiques, devait aussi, à en juger par les données de l'archéologie préhistorique, être très primitif au point de vue intellectuel. » Cette vision péjorative a peu évolué jusqu'au milieu du XX[e] siècle.

L'AUTEUR



Jacques JAUBERT est professeur de préhistoire à l'université de Bordeaux et membre du laboratoire PACEA (université Bordeaux 1-CNRS).

L'ESSENTIEL

- **À plus de 300 mètres de l'entrée de la grotte de Bruniquel se trouvent d'énigmatiques structures réalisées à partir de stalagmites.**
- **Les premiers chercheurs qui les ont étudiées ont suggéré que leurs auteurs pouvaient être des Néandertaliens.**
- **Une équipe franco-belge vient d'établir que ces structures datent de 176 500 ans, un âge stupéfiant.**
- **Les auteurs des constructions étaient donc des ancêtres des Néandertaliens classiques, avec une société déjà sophistiquée.**

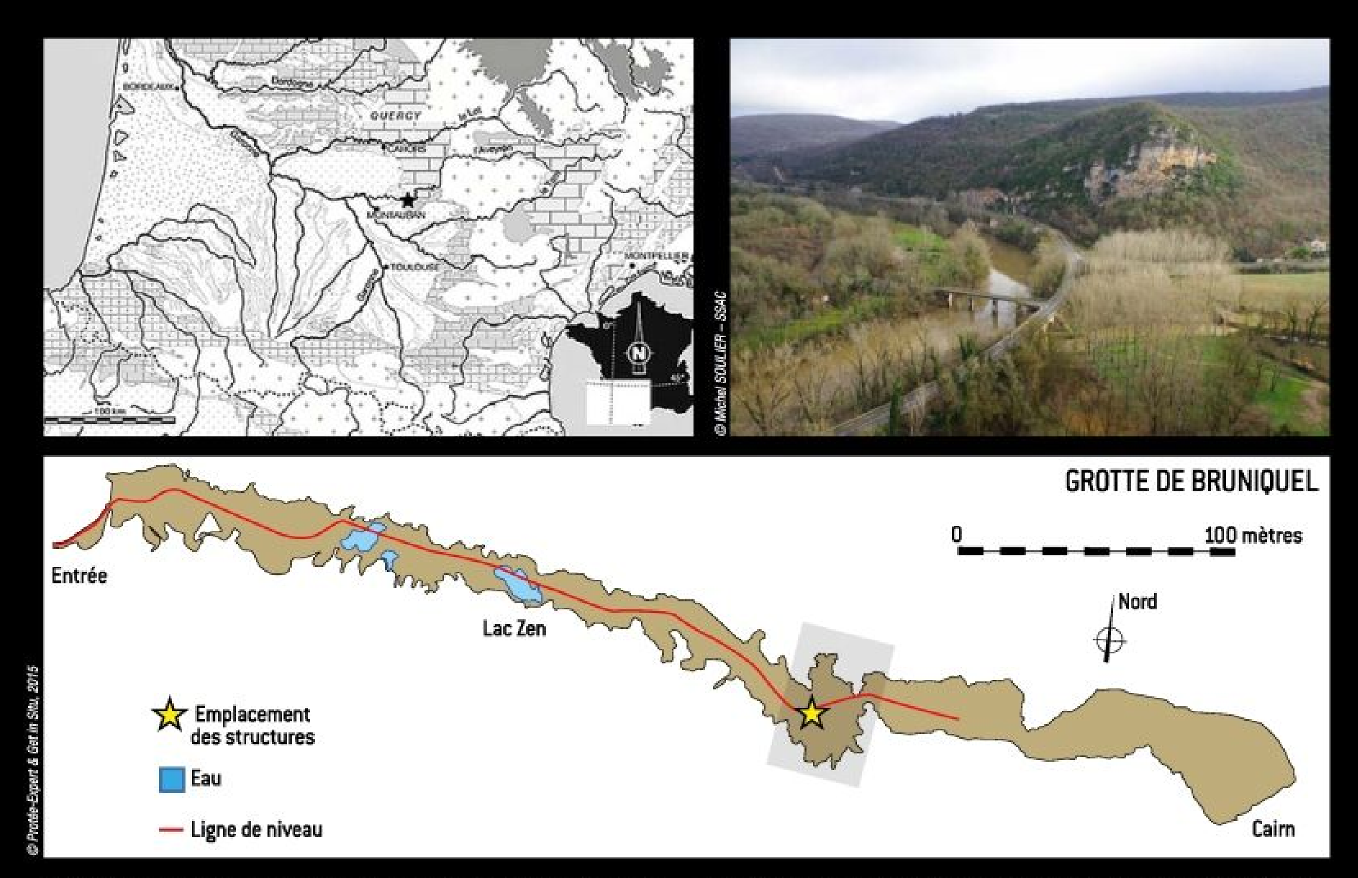
Les paléoanthropologues ont ensuite imposé l'idée que les Néandertaliens constituaient une espèce distincte de la nôtre, qui a occupé un vaste territoire et que les progrès de la chronologie replacent dans sa véritable profondeur temporelle. En particulier, nous savons désormais que l'homme de Néandertal, *Homo neanderthalensis*, est issu d'une longue lignée qui a progressivement émergé en Europe il y a environ un demi-million d'années, à partir d'une souche nommée *Homo heidelbergensis*. Les préhistoriens et les paléoanthropologues qui se sont succédé depuis les années 1960 ont petit à petit décrit une espèce, certes différente d'*Homo sapiens*, mais dont les capacités cognitives sont de plus en plus apparues comme difficiles à distinguer de celles de nos ancêtres *sapiens*.

Une espèce humaine modelée par le froid

Deux phénomènes principaux ont formé l'espèce *Homo neanderthalensis* : d'une part, une dérive génétique due au long isolement, produit par la réduction des espaces habitables, coincés entre les masses de glaces et les différents littoraux européens ; d'autre part, un modelage de cette forme humaine (une sélection de ses caractéristiques biologiques) par les conditions climatiques froides. Cela a conféré à ces populations une anatomie de mieux en mieux adaptée au froid des zones périglaciaires.

Vers 125 000 ans avant le présent, quand commence la dernière période interglaciaire (donc tempérée), tous les traits biologiques des Néandertaliens pleinement évolués – on les qualifie de classiques – étaient quasiment en place. L'anatomie particulière des Néandertaliens pourrait aussi résulter en partie de comportements répétés associés à leur mode de vie de chasseurs-cueilleurs ou à certaines de leurs activités techniques. Quoi qu'il en soit, il y a quelque 40 000 ans, ces Néandertaliens pleinement évolués ont disparu, au moment où nos ancêtres *H. sapiens* mettaient les pieds en Europe…

Cette extinction a toutefois été précédée d'un contact. On sait en effet que les Néandertaliens, poussés par la crise climatique très rigoureuse du SIM 4 (71 000 à 57 000 ans), ont migré vers le sud jusqu'au Proche et Moyen-Orient, où ils ont croisé une vague d'hommes modernes issue d'Afrique.



LA GROTTE DE BRUNIQUEL SE SITUE DANS UN MASSIF CALCAIRE du Quercy *(en haut à droite)* surmontant l'Aveyron, un affluent du Tarn, lui-même affluent de la Garonne *(en haut à gauche)*. Longue de plus de 400 mètres, cette grotte forme un long souterrain rectiligne plus ou moins parallèle à la vallée *(ci-dessus)*. Son entrée est aujourd'hui condamnée, mais à l'époque où des humains l'ont arpentée, elle devait être ouverte vers l'extérieur. Le trait rouge représente le trajet menant à quelque 300 mètres de l'entrée, là où se trouvent les structures. Pour le couvrir, il faut franchir plusieurs passages étroits, escalader un chaos de blocs, contourner des massifs rocheux, ce qui demande en plus de bien s'éclairer. Bref, il faut accomplir dans un milieu obscur un parcours qui, sans être extrême, est difficile.

Cette rencontre est probablement liée au métissage que nous a révélé le séquençage du génome d'*H. neanderthalensis* : en effet, le génome des Eurasiens actuels contient en moyenne 2 % de gènes néandertaliens. Les Néandertaliens comptent donc parmi nos ancêtres.

Revenons à Bruniquel et à la façon dont y ont été mises en évidence les activités étranges de très anciens Néandertaliens. La grotte a été découverte en février 1990 par un jeune spéléologue, Bruno Kowalscewski. C'est la société spéléo-archéologique de Caussade (SSAC) qui, sous l'impulsion de son président Michel Soulier, l'explore et, depuis, la protège impeccablement. Pour y accéder, les spéléologues ont dû franchir deux passages étroits, puis dévaler un immense cône d'éboulis obstruant ce qui devait être le porche d'origine, avant de parvenir ensuite dans une splendide grotte naturelle. Dans ce milieu, presque irréel, alternent de petits lacs d'eau claire parsemés de calcite flottante (concrétion en pellicule si légère qu'elle flotte), d'immenses draperies translucides tombant de la voûte, des rideaux de minuscules fistuleuses, des colonnes stalagmitiques scintillantes et toutes sortes de concrétions jaunies ou rougies par les oxydes de fer ou les revêtements argileux. Depuis que les hommes et les ours ont quitté la grotte il y a des dizaines de millénaires, les sols sont intacts.

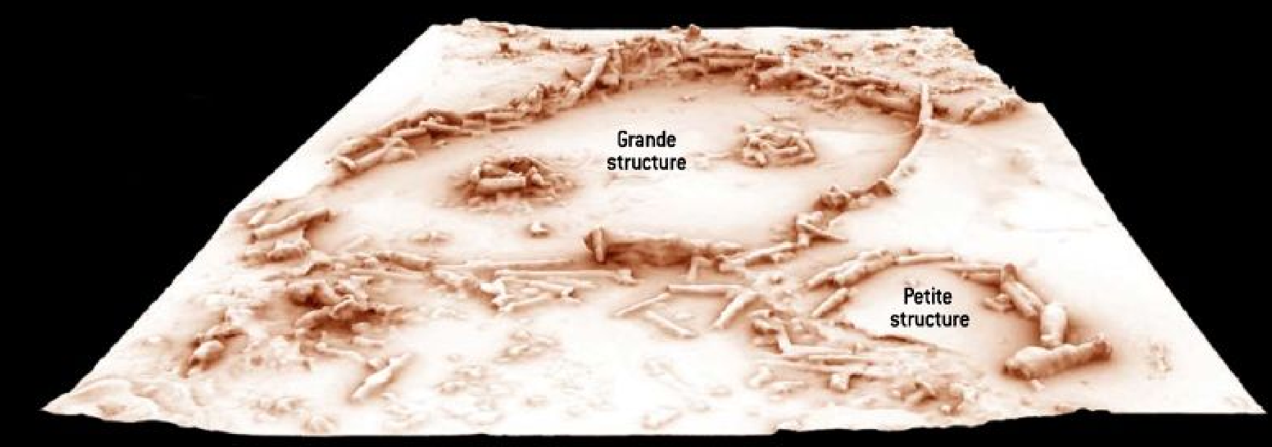
Michel Soulier alerte alors François Rouzaud, conservateur en chef du patrimoine à la direction des affaires culturelles de la Région Midi-Pyrénées et, en 1992 et 1993, mène avec lui deux campagnes de prospection. Les premières salles de la grotte recèlent des dizaines de bauges d'ours et autres griffades sur les parois, ainsi que de nombreux ossements affleurant en surface. La faune de l'éboulis d'entrée est composée d'espèces telles que le cheval, le bison (ou l'aurochs) et le cerf, mais nous ne savons pas encore si elle est contemporaine ou non des structures. Par ailleurs, les importants dépôts de calcite antérieurs et postérieurs à l'érection des structures indiquent que ces dernières datent de ce qu'on nomme un interstade, à savoir un court répit de climat tempéré encadré par des phases nettement plus rigoureuses. Ces phases peuvent cependant être assez longues pour être accompagnées d'importants dépôts de calcite, car les concrétions ne se forment que sous des conditions clémentes et suffisamment humides.

Toutefois, ce sont surtout les étranges structures situées à 336 mètres de l'entrée qui retiennent l'attention des premiers explorateurs. Elles ont manifestement été réalisées par des humains à l'aide de tronçons de stalagmites, agencés parfois sur plusieurs rangs. Deux structures grossièrement annulaires se distinguent, l'une mesurant 6,70 par 4,50 mètres et l'autre 2,20 par 2,10 mètres.



© Michel SOULIER – SSAC / Nature Jaubert et al.

LES STRUCTURES CONSTRUITES PAR DES NÉANDERTALIENS dans la grotte de Bruniquel se présentent sous la forme de deux accumulations circulaires constituées de quelque 400 tronçons de stalagmites, avec une régularité de diamètres et de longueurs. Ces tronçons, qui ne sont pas sans rappeler la forme de billots de bois, sont empilés parfois sur quatre rangs ; certains d'entre eux ont été employés pour étayer la construction. L'ensemble est parsemé de multiples restes de foyers. Aujourd'hui, la structure est figée sous la calcite qui s'est déposée depuis sa construction, prenant notamment la forme de nouvelles stalagmites *(barres blanches dans l'image ci-contre)*. C'est pourquoi, afin de mieux se rendre compte de l'apparence de la structure peu après sa construction, l'équipe de l'auteur a reconstitué par ordinateur une image en trois dimensions de la scène telle qu'elle serait apparue dans le passé *(ci-dessous)*.



© Xavier MUTH - Get in Situ, Archéotransfert - SHS-3D, base photogrammétrique 3D Pascal Mora

En 1995, le duo Rouzaud–Soulier fait dater un échantillon d'os brûlé prélevé dans l'un des vestiges de foyers découverts. Le résultat est ambigu : plus de 47 600 ans, c'est-à-dire au-delà de la date limite d'application de la méthode du carbone 14…

Cette date limite est antérieure à l'arrivée d'*H. sapiens* en Europe. Peut-on vraiment envisager que l'homme de Néandertal soit à l'origine de ces curieuses accumulations ? Dès cette époque, plusieurs préhistoriens adhèrent timidement à cette idée (nous y reviendrons), mais, en l'absence de datation solide, ils ne la soutiennent que très prudemment.

Je fais alors partie des quelques privilégiés à qui François Rouzaud fait visiter la grotte. À l'issue de cette visite, rien ne peut me suggérer un âge aussi ancien. Spécialiste des Néandertaliens, j'ai passé une bonne partie de ma vie à étudier leur mode de vie et leur comportement. Comme la plupart de mes confrères, je peux difficilement imaginer qu'il se soit approprié le milieu souterrain, qui plus est pour y aménager des structures comparables à celles que les préhistoriens mettent péniblement en évidence dans ses habitats de plein air. L'exploration profonde du monde souterrain n'est jusqu'à ce jour pas caractéristique de temps aussi reculés, mais elle l'est de certains hommes modernes d'un Paléolithique plus récent, ceux qui nous ont laissé dans les grottes de Lascaux et d'autres ces magnifiques peintures, gravures et modelages en argile.

La date de 47 600 ans peut aussi s'expliquer par la récupération d'un os laissé par un ours bien avant. Pour sa part, François, qui est à l'origine un spéléologue converti à l'archéologie souterraine toutes époques confondues, n'est pas freiné par nos paradigmes de préhistoriens, et il sait que cet os brûlé provient de l'un des foyers qui parsèment les structures. Clairement, il faut compléter la première datation, isolée et imprécise… Malheureusement, François Rouzaud décède peu après, en 1999, ce qui stoppe pour des années l'enquête qu'il a lancée avec Michel Soulier.

Le devoir d'inventaire

C'est une géologue de l'Institut royal des sciences naturelles de Belgique qui va la relancer presque deux décennies plus tard. Guidée par Michel Soulier, Sophie Verheyden imagine une nouvelle stratégie : dater la calcite de part et d'autre de la couche correspondant à la construction des structures. La calcite, rappelons-le, est du carbonate de calcium ($CaCO_3$) parsemé

de minéraux à l'état de traces, déposé par l'eau ayant dissous du calcaire qui parcourt les grottes karstiques, c'est-à-dire formées par érosion hydrochimique. Les auteurs des constructions ont en effet basculé à l'horizontale des tronçons de stalagmites constitués de calcite ancienne, sur lesquels a poussé une calcite nouvelle, voire de nouvelles stalagmites – des « repousses ». Il est donc possible de distinguer les concrétions anciennes des nouvelles, postérieures à l'érection des structures. Or depuis les années 1990, les méthodes de datation de la calcite ont fait d'immenses progrès.

Sophie fait part de son idée au paléoclimatologue Dominique Genty, du laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (Gif-sur-Yvette), qui travaille sur les concrétions des grottes de Chauvet-Pont d'Arc (Ardèche), de Cussac et de Villars (Dordogne) ; Dominique me parle du projet de Sophie ; je connais déjà Michel Soulier. La boucle est bouclée. Rapidement, nous nous adjoignons des membres du service régional d'archéologie de Midi-Pyrénées, notamment Frédéric Maksud avec qui je travaille depuis longtemps. Contactés, les propriétaires du site donnent leur accord à la condition d'un respect absolu de la grotte ; de même pour le ministère de la Culture, de sorte qu'une première campagne a lieu en mai 2014, suivie d'une seconde en mai 2015.

Les résultats de la première mission sont décisifs : avec Fred, Michel et Sophie, nous réalisons – le plus souvent les pieds dans l'eau – un inventaire complet des éléments constituant les structures ; il s'agit de préciser le statut, l'état de conservation et les dimensions de chacun des 399 « spéléofacts ». Nous avons forgé ce néologisme pour désigner les artefacts (tout objet résultant d'une action humaine) par détournement de spéléothèmes (concrétions). Michel photographie chaque spéléofact, mais aussi tous les os carbonisés découverts en association avec les structures. C'est Pascal Mora de l'université Bordeaux-Montaigne qui réalise la couverture photogrammétrique restituant précisément la structure dans son état actuel *(voir la figure sur la page de gauche)*.

Alors que le duo Rouzaud-Soulier n'avait signalé que deux « foyers », nous en identifions dix-huit. Nous repérons ces « points de chauffe » par la présence de calcite rougie ou noircie par la suie, éclatée par l'action de la chaleur, mais aussi

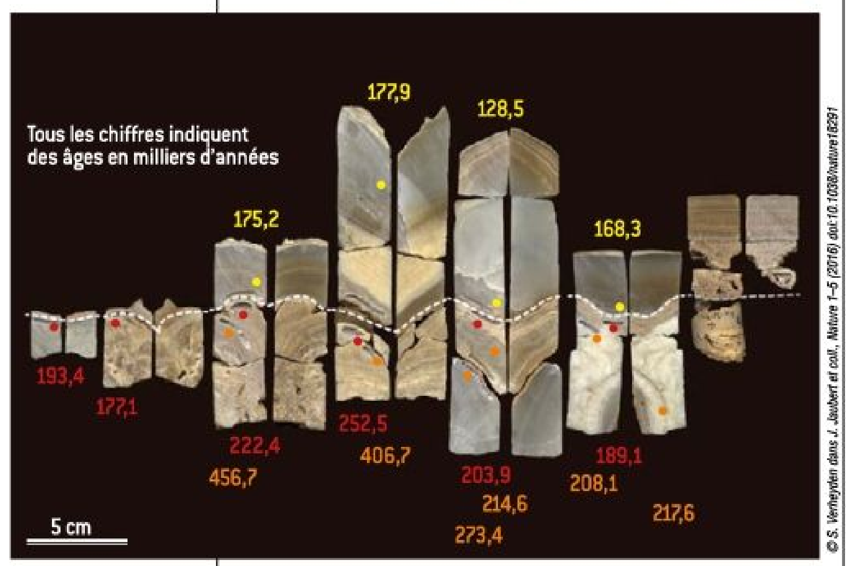
LA DATATION DES STRUCTURES

La première incertitude à lever avant de pouvoir interpréter les structures était celle de leur ancienneté. En 1995, une datation au radiocarbone d'un os brûlé a révélé que les structures de la grotte de Bruniquel dataient d'au moins 47 600 ans (la limite de la datation par le carbone 14). L'équipe de l'auteur a entrepris de déterminer leur âge par la méthode radiométrique uranium-thorium avec l'aide de collègues des universités de Xi'an (Chine) et du Minnesota (États-Unis). Pour ce faire, Sophie Verheyden, de l'Institut royal des sciences naturelles de Belgique, et Dominique Genty, du CEA, ont déterminé 14 microsondages à pratiquer dans la structure, de façon à avoir dans la même carotte à la fois de la calcite antérieure et de la calcite postérieure à la construction.



LE CAROTTAGE d'une couche de calcite du sol de la structure est une opération qui demande plusieurs minutes de forage.

© Michel SOULIER – SSAC / Nature Jaubert et al.



© S. Verheyden dans J. Jaubert et coll., Nature 1–5 (2016) doi:10.1038/nature18291

LES ÂGES EN ROUGE ET EN ORANGE *(en bas)* sont ceux issus d'échantillons prélevés sur les stalagmites, qui ont servi à l'érection des structures, donc les plus anciens, puisqu'ils correspondent à l'arrêt de croissance du matériau d'œuvre. Ceux en jaune *(en haut)* ont été échantillonnés à la base des repousses qui, elles, scellent la structure et sont forcément d'âge plus récent. Les uns et les autres prennent donc en sandwich le moment de la construction, matérialisé ici par un pointillé blanc, soit 176 500 ans, à 2 000 ans près.

à des vestiges brûlés, notamment des os calcinés coincés dans les structures. Nous confirmons cet inventaire en mesurant les anomalies magnétiques créées par la combustion. François Lévêque de l'université de La Rochelle les identifiera en deux campagnes. De la cartographie des points de chauffe produite ressort l'impression que les constructeurs ou utilisateurs des structures se sont éclairés par des feux alimentés semble-t-il avec un combustible constitué d'os.

Frédéric Santos, du CNRS à Bordeaux, montre de son côté que les structures ont mobilisé entre 2,1 et 2,3 tonnes de calcite. Ses calculs prouvent par ailleurs que ces amas de tronçons de stalagmites ne sauraient résulter de quelque accumulation naturelle à la faveur du ruissellement, voire de l'activité des ours ! Du reste, les quelque 400 spéléofacts ont bien été calibrés. Ceux qui ont servi à constituer la grande structure, par exemple, présentent des diamètres similaires et des longueurs comparables, et sont disposés en rangs : on en observe jusqu'à quatre superposés. Les tronçons des petites structures centrales, en revanche, sont de dimensions plus modestes. De petits éléments de calage et de grands tronçons étayant la grande structure complètent le dispositif.

Bien entendu, outre cet inventaire, l'objectif principal de cette première campagne de terrain est de prélever des échantillons pour les dater. Sous la conduite de Sophie et de Dominique, Édouard Régnier réalise avec sa carotteuse sur batteries trois forages à la base des repousses stalagmitiques qui scellent les structures, trois autres au sommet des spéléofacts qui les constituent et, enfin, un dans le plancher de calcite formant le sol de la grande structure. D'autres échantillons de calcite sont prélevés sur des stalagmites situées dans le secteur de l'entrée pour dater l'éboulis comblant l'ancien porche de la grotte. Une fois à Bruxelles, Sophie conditionne les échantillons et les envoie pour datation par la méthode uranium-thorium (méthode radiométrique) au laboratoire de son collègue Hai Cheng à Xi'an en Chine.

Nous avons eu tort à ce moment-là de ne pas lancer des paris ! Selon Dominique, les grandes repousses qui scellent les structures ne pouvaient être qu'anciennes, datant au minimum du Pléistocène (plus de 11 700 ans). Dans le même temps, il nous poussait à nous méfier de l'aspect extérieur parfois trompeur de ces cierges immaculés. Tout était possible… Pour ma part, j'aurais été comblé par un âge paléolithique récent de 15 000, 25 000 ou 30 000 ans, qui aurait justifié les réflexes que j'avais eus à l'époque où Michel Soulier m'avait guidé dans la grotte. Dans nos rêves les plus fous, nous espérions atteindre l'extrême fin du Paléolithique moyen, c'est-à-dire un âge supérieur à 42 000 ans, qui nous aurait prouvé – chose sensationnelle – que les auteurs des structures étaient bien les derniers Néandertaliens. Cette idée, que les pionniers de Bruniquel François Rouzaud, Michel Soulier et Yves Lignereux avaient très prudemment avancée dès 1995 dans la revue *Spelunca*, semblait osée…

18 foyers ont servi aux bâtisseurs des structures à s'éclairer lorsqu'ils venaient dans la grotte

Après trois mois de ces supputations, Sophie reçut un tableau de résultats bruts qu'elle dut d'abord réorganiser afin de pouvoir associer les mesures aux échantillons et les interpréter. Quand elle me téléphona au cœur du mois d'août 2015, elle me demanda d'abord si j'étais bien assis, puis elle m'annonça une date stupéfiante : 176 500 ans ! D'après Sophie, je suis resté silencieux de longues secondes… Cet âge impliquait que les créateurs des structures de Bruniquel étaient les ancêtres des Néandertaliens classiques, qui vivaient en même temps que les premiers *H. sapiens* archaïques !

La stupeur passée, j'ai demandé et redemandé à Sophie si ce résultat était fiable. Elle était catégorique. Dans un parc d'Udine en Italie où j'étais en vacances avec ma famille, j'ai alors longuement recherché le wifi, afin de récapituler dans un long message les premières conséquences de cette nouvelle. Dominique a aussitôt proposé de retourner à Bruniquel procéder à un nouvel échantillonnage, et prélever cette fois de l'os brûlé recouvert de calcite, ce qui apporterait une preuve supplémentaire de la présence humaine et donc de l'origine humaine des structures.

Puis nous nous sommes retrouvés tous les quatre à Toulouse afin d'arrêter une stratégie de publication. Serge Delaby, le compagnon de Sophie, était là aussi, et

nous a bien aidés grâce à son expérience de géologue-spéléologue. S'agissant d'une découverte de ce calibre, une revue du rang de *Nature* s'imposait. Nous avons alors arrêté tout ce qu'il fallait faire pour obtenir les résultats complets et incontestables que nous souhaitions. Menée au début de 2015, la seconde mission dans la grotte a été consacrée à cette tâche, notamment en accompagnant de nouveaux spécialistes sollicités pour compléter les études.

Ainsi, David Cochard, de l'université de Bordeaux, réétudia la faune restée en place depuis les années 1990. Avec Sophie, Christian Burlet, un jeune géologue belge décrivit les carottages prélevés dans la calcite d'un point de vue géologique. Dans les années 1990, les pionniers de Bruniquel Yves Lignereux et Lionel Laffont, tous les deux vétérinaires, avaient réalisé la première étude de la faune. Une fois récupéré, leur matériel a été confié à Myriam Boudadi-Maligne, du CNRS à Bordeaux, qui a confirmé leurs analyses. Point remarquable, il s'avérera que la grotte avait surtout été fréquentée par l'ours brun (*Ursus arctos*). On aurait pu s'attendre en effet à ce qu'elle l'ait aussi été par l'ours des cavernes (*Ursus spelaeus*), le concurrent habituel des hommes dans les grottes.

Il nous semblait impensable de publier les résultats de notre étude sans les accompagner d'une topographie de précision : nous avons sollicité pour cela Hubert Camus et ses collègues Xavier Muth et Benoît Martinez des sociétés Hypogée (à Sommières, dans le Gard) et Get in Situ (en Suisse). Au cours de longues séances de prises de mesure, ils ont épuisé Michel Soulier et plusieurs de ses collègues de la SSAC…

Intense mise au point

Finalement, après une intense mise au point commune dans la maison de l'un d'entre nous proche de Bruniquel, nous sommes en mesure de soumettre un article en août 2015. Après téléchargement des fichiers du manuscrit sur le site du célèbre hebdomadaire britannique, la bonne nouvelle arrive : il va être soumis à l'avis de deux de nos pairs. Première victoire, car seule une très faible proportion des soumis à *Nature* n'est pas rejetée au premier examen. Le premier rapporteur est convaincu d'emblée, tandis que le second réclame à plusieurs reprises des compléments démontrant mieux à ses yeux

Une mesure de notre ignorance

Wil Roebroeks est professeur de préhistoire à l'université de Leyde aux Pays-Bas et vice-président de la Société européenne pour l'étude de l'évolution humaine (ESHE). Il nous fait part de ses premières observations sur Bruniquel.

Les 176 500 ans des structures de Bruniquel sont-ils une surprise ?

Wil Roebroeks : Plus que leur âge, la présence de ces structures dans la profondeur de la grotte est pour moi la plus grande surprise.

Pourquoi ?

W. R. : Parce qu'elles sont uniques dans tout le registre archéologique préhistorique. À part cela, nous ne disposons que du cercle d'os de mammouths de Molodova, en Ukraine, que l'équipe de Marylène Pathou-Mathis (CNRS/MNHN) vient de réinterpréter comme une base d'habitation construite par des chasseurs de mammouth néandertaliens il y a quelque 50 000 ans. Sinon, rien !

Que nous montrent ces structures à ce stade ?

W. R. : À ce stade, elles sont importantes, parce qu'elles nous donnent une impression de l'étendue de ce que nous ignorons. Nous savions déjà que les données concernant les Néandertaliens et les populations préhistoriques en général sont très biaisées par la mauvaise préservation des traces de ces chasseurs-cueilleurs mobiles. De fait, quand le hasard de la fossilisation fait que quelque chose est préservé dans un domaine jusque-là complètement inconnu, comme à Bruniquel, voilà que nous découvrons l'inattendu.

***Homo neanderthalensis* dans le milieu souterrain profond, est-ce aussi étonnant ?**

W. R. : Cela le semble, mais ça ne l'est pas tant si l'on y réfléchit. Néandertal est un humain, donc un primate, et tous les primates sont curieux. Il a exploré une multitude de milieux variés en Eurasie et s'est toujours adapté. Curieux et adaptable, il a voulu aussi explorer le milieu souterrain, qui commençait à l'entrée des grottes, où il se réfugiait…

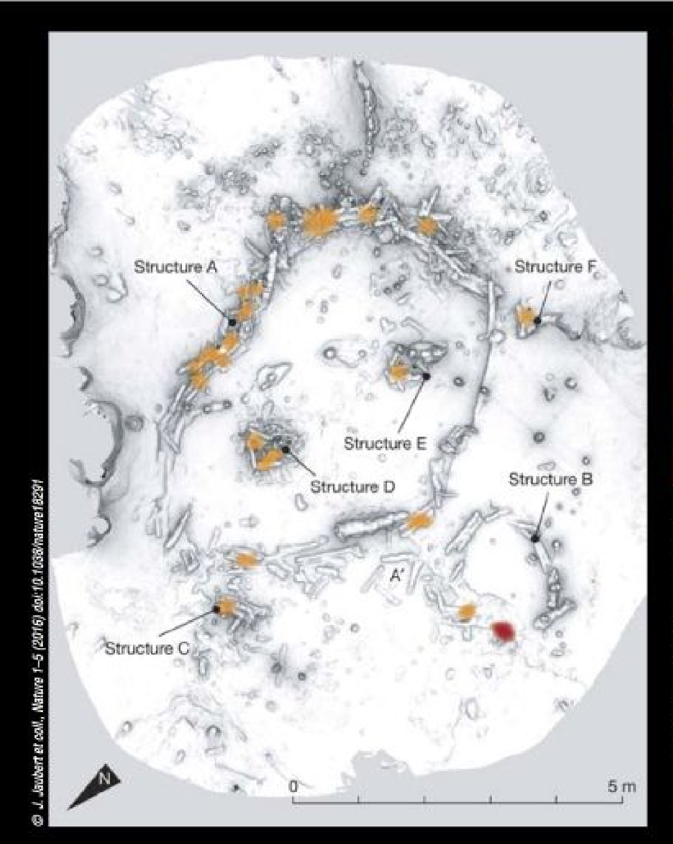
La présence de Néandertaliens dans un milieu obscur prouve qu'ils maîtrisaient le feu. À quel point ?

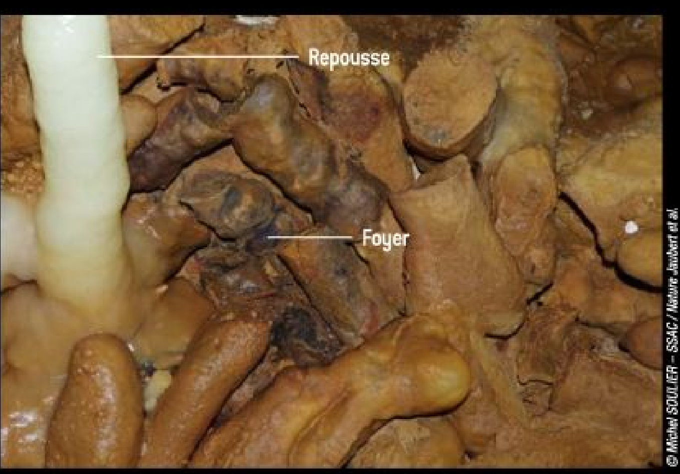
W. R. : Grand débat ! Il y a deux écoles : ceux qui placent la maîtrise du feu très tardivement dans l'histoire humaine et ceux qui pensent qu'elle a existé bien plus tôt. En étudiant la question avec Paola Villa, de l'université du Colorado, nous avons observé que les traces de feu deviennent fréquentes sur tous les sites postérieurs à 400 000 ans et omniprésentes à partir de 300 000 ans, tant en Europe qu'au Proche-Orient. Cela suggère que les humains sont devenus capables de créer du feu à volonté. Bruniquel va dans ce sens.

Il est trop tôt pour interpréter, mais quels indices pourraient nous y aider selon vous ?

W. R. : Il faut avant tout déterminer avec certitude où se trouvait l'entrée de la grotte de Bruniquel au moment de la réalisation des structures ; ensuite, il sera très utile d'étudier le sol qui existait à l'époque où les Néandertaliens sont venus dans la grotte, et d'essayer de déterminer ce qu'ils y ont fait.

Propos recueillis par François Savatier





CES STALAGMITES NOIRCIES *(ci-dessus)* ont été chauffées, les visiteurs néandertaliens de la grotte ayant fait du feu. En tout, plus de 18 traces de foyers, ou du moins de points chauds, ont été découvertes, notamment grâce à la mesure des anomalies magnétiques qui leur sont associées. Trois d'entre elles se trouvent sur les accumulations de stalagmites situées à l'intérieur de la grande structure. Tous ces foyers ont été allumés en hauteur par rapport au sol, sur des amoncellements de tronçons de stalagmites – probablement pour mieux éclairer la salle pendant les séjours des Néandertaliens.

l'origine anthropique (humaine) des structures et… des zones de combustion. Cela peut surprendre que l'on se demande si des traces de feux dans une grotte humide ont pu résulter d'un phénomène naturel… mais rien n'est évident pour qui n'a pas été sur le terrain. Pour achever de convaincre le rapporteur, nous finirons par procéder à de nouvelles analyses grâce à… Jean-Noël Rouzaud, directeur de recherche au CNRS, un spécialiste des restes carbonisés à qui son frère François avait confié en son temps des échantillons. Sollicité par l'une d'entre nous, Catherine Ferrié, géologue à l'université de Bordeaux, il les retrouve et, avec Damien Deldicque de l'École normale supérieure, il les analyse par spectrométrie Raman afin de prouver qu'il s'agit bien de matière organique carbonisée et non de quelque matière noirâtre naturelle, comme le manganèse par exemple… Finalement, après moult péripéties, un article est publié en ligne le 27 mai 2016, qui s'attire immédiatement une forte attention médiatique, dont celle de *Pour la Science*…

Que nous apprennent finalement ces structures depuis la reprise des travaux ? Essayons de répondre factuellement. Tout d'abord, que le groupe à l'origine des structures de Bruniquel relève bien de la lignée néandertalienne. Ensuite, qu'il a vécu plus de 100000 ans avant les Néandertaliens classiques. Or ces Néandertaliens, dont les fossiles ont été retrouvés à Neandertal, en Allemagne, à Spy, en Belgique, à La Chapelle-aux-Saints, à La Ferrassie, La Quina, Le Regourdou, Saint-Césaire, en France, etc., sont ceux qui imprègnent notre imaginaire. Là, il s'agit de leurs ancêtres extrêmement lointains, puisque bien plus de temps s'est écoulé entre les Néandertaliens de Bruniquel et leurs descendants classiques qu'entre ces derniers et nous…

Loin sous la terre

Ensuite, force est de constater qu'une partie du groupe néandertalien vivant dans les environs de Bruniquel vers 176500 ans avant le présent s'est approprié le milieu souterrain, parvenant à s'affranchir de l'obscurité la plus complète, au risque d'y rencontrer un ours ou une hyène. S'aventurer loin sous la terre n'est pas anodin. Toutes les populations humaines actuelles ne vont pas explorer le tréfonds des grottes… même si elles ont la maîtrise technique de l'éclairage. Jusqu'à présent, nous pensions

que seul l'homme moderne s'y était aventuré. À cet égard, on cite souvent la réalisation de premières œuvres pariétales dans la grotte de Chauvet-Pont d'Arc, il y a quelque 36 000 ans, comme marqueur de la première spéléologie humaine… Il serait à la rigueur possible de repousser le curseur jusqu'à 40 000 ans en tenant compte de quelques grottes espagnoles, dont celle d'El Castillo, même si l'auteur des peintures est encore controversé… Avec Bruniquel, tout change.

Des constatations faites à Bruniquel, il résulte que les Néandertaliens anciens maîtrisaient parfaitement des techniques d'éclairage, donc le feu et son entretien à long terme sous la forme de torches ou de lampes portables. Certes, on sait que les humains emploient le feu depuis au moins 700 000 ans (au Proche-Orient), mais son usage généralisé n'est intervenu que vers 300 000 à 250 000 ans avant le présent. Pour le moment, l'archéologie n'a livré aucune lampe néandertalienne, alors qu'elles sont attestées dans les grottes ornées par *H. sapiens* au Paléolithique récent.

Enfin, l'étude des structures montre que ces hommes ont réalisé un projet exigeant une conception, la recherche des matériaux adéquats, leur transport, le calibrage des éléments mis en place dans les structures, le recours à des astuces de construction, tel l'emploi de cales. Le tout implique la mobilisation et la direction d'une équipe, qu'il a fallu éclairer afin de rendre son travail possible. Les multiples points de chauffe ou d'éclairage avec l'os comme combustible prouvent un indiscutable savoir-faire dans la maîtrise et l'entretien de foyers, que l'on doit d'abord interpréter comme des sources de lumière.

Peut-on être plus spécifique et attribuer une fonction aux structures de Bruniquel ? Après leur découverte, plusieurs préhistoriens français – Michel Lorblanchet, Dominique Baffier et Jean Clottes – les mentionnèrent à partir des informations communiquées dans la revue *Spelunca* comme de possibles réalisations néandertaliennes. Bien vu. En 2012, le paléoanthopologue canadien Brian Hayden les rejoint et évoque même la possibilité que la grotte ait été un lieu de culte. Outre cet usage symbolique et d'autres qui peuvent être envisagés, d'autres fonctions, plus concrètes, sont imaginables. Un habitat ? Un gisement de matières premières ? Autre chose ? Si plusieurs collègues ont déjà exprimé leur avis, nous estimons pour notre part qu'en l'absence d'indices supplémentaires, il est prématuré de formuler une hypothèse vérifiable. Une étude archéologique plus resserrée devra nous apporter davantage d'information. Pour cela, il faudra ouvrir des fenêtres dans le plancher de calcite de la structure principale et atteindre le sol foulé par les Néandertaliens.

Finalement, Bruniquel contribue à la longue série d'études comparatives d'*H. sapiens* et d'*H. neanderthalensis*. Ces travaux de recherche, notamment ceux qu'a menés par exemple Francesco d'Errico, de l'université de Bordeaux, indiquent désormais clairement que les deux espèces ont évolué simultanément, l'une en Afrique et l'autre en Europe, où elles ont atteint aux mêmes époques des stades cognitifs comparables et la même capacité à l'innovation, qu'elle soit technique, technologique, comportementale, sociale, économique, de subsistance ou encore symbolique. Tour à tour, l'Afrique avec *H. sapiens* ou l'Europe avec *H. neanderthalensis* inventent, créent, innovent et avancent vers la « modernité » sans que nous puissions les départager. Bruniquel rajoute une ligne au palmarès de l'hémisphère Nord : on y a très tôt conquis le milieu obscur et dangereux des grottes karstiques.

La société néandertalienne était bien plus sophistiquée qu'on ne l'avait envisagé. Bruniquel en apporte la preuve

Une société sophistiquée

Certes, les études et les datations de Bruniquel ne révolutionnent pas l'ensemble de la préhistoire ancienne. Pour que cela soit le cas, il aurait fallu découvrir au moins des œuvres peintes ou gravées associées aux structures. Pour l'heure, l'art figuratif est toujours l'apanage des hommes modernes. Toutefois, Bruniquel contribue fortement à cette inlassable reconquête d'un statut revu et corrigé… en mieux pour Néandertal. La société néandertalienne était bien plus sophistiquée que nous l'avons envisagé et Bruniquel en apporte une nouvelle preuve. Desservi par son anatomie robuste et puissante, Néandertal est passé et passe encore pour une brute inférieure aux yeux du plus grand nombre. En réalité, ses capacités cognitives, techniques et adaptatives impressionnent toujours plus les préhistoriens. ■

BIBLIOGRAPHIE

J. Jaubert *et al.*, **Early Neandertal constructions deep in Bruniquel cave in southwestern France**, *Nature*, en ligne le 25 mai 2016.

B. Hayden, **Neandertal social structure**, *Oxford J. Archaeol.*, vol. 31, pp. 1-26, 2012.

D. Baffier, **Les derniers Néandertaliens. Le Châtelperronien**, La Maison des Roches, 1999.

M. Lorblanchet, **La Naissance de l'Art. Genèse de l'Art Préhistorique**, Errance, 1999.

F. Rouzaud, M. Soulier et Y. Lignereux, **La grotte de Bruniquel**, *Spelunca*, vol. 60, pp. 27-34, 1996.



BIODIVERSITÉ le paradoxe du pigeon

Anne Teyssèdre

EN FRANCE, le nombre de pigeons ramiers a augmenté de 169 % depuis 1989.

ramier

Bonne nouvelle : en Europe comme en Amérique du Nord, la biodiversité locale augmente. Mauvaise nouvelle : à l'échelle de la planète, la biodiversité continue de s'éroder. Tel est le paradoxe du pigeon ramier mis en lumière par les écologues.

L'ESSENTIEL

- **Une métaanalyse récente a montré que, malgré l'érosion de la biodiversité à l'échelle globale, le nombre d'espèces ne diminue pas à l'échelle locale.**
- **Ce résultat est cohérent avec la théorie écologique actuelle.**
- **Diverses observations le confirment en montrant que les espèces qui prospèrent masquent la disparition de nombreuses espèces plus vulnérables.**



Vous êtes-vous récemment promené au jardin des Plantes, à Paris ? Dans ce cas, vous avez sans doute remarqué les nombreux oiseaux qui le peuplent. La perruche à collier y est encore rare : échappé de captivité dans les années 1970, un groupe pionnier de cette espèce répandue en Asie et en Afrique a depuis colonisé l'Île-de-France, et quelques couples ont dernièrement élu domicile dans les parcs parisiens, reconnaissables à leur plumage vert tendre et à leurs cris stridents. Pigeons ramiers et corneilles, pour leur part, y sont de plus en plus nombreux, tandis que chardonnerets, moineaux domestiques et verdiers ne sont plus si faciles à croiser au détour des allées.

À l'échelle mondiale, cela ne fait guère plus aucun doute : la biodiversité animale et végétale s'érode actuellement en nombre d'espèces, sous-espèces et variants génétiques sous la pression croissante des sociétés humaines. C'est la tendance que révèlent les indicateurs de biodiversité mondiaux que sont l'index « liste rouge » des espèces menacées (dit RLI), publié chaque année par l'Union mondiale pour la nature (UICN) et, pour les populations de vertébrés, le Living Planet Index (ou LPI) suivi par le Fonds mondial pour la nature (WWF). La situation est en revanche beaucoup moins claire à l'échelle locale ou régionale.

Dans leur habitat local – parc, ville, forêt ou rivière, par exemple –, les espèces animales et végétales, terrestres ou aquatiques, vivent et interagissent au sein de communautés et de réseaux écologiques, et réagissent aux changements environnementaux. Nombre d'entre elles, plus sensibles ou davantage exposées, se raréfient, voire s'éteignent. Tarier des prés, alouette lulu, linotte mélodieuse, vanneau huppé… Les effectifs de tous ces oiseaux naguère très communs dans les campagnes de France sont en diminution depuis plus de vingt ans, en réponse au changement de leurs conditions de vie. D'autres espèces en revanche, plus adaptables ou mieux préparées – exaptées – à ces changements, se multiplient dans les habitats modifiés ou en colonisent de nouveaux et étendent leur aire de répartition. C'est le cas par exemple des nombreuses espèces dites commensales de l'homme qui, tels les pigeons ramiers, les chats et les souris domestiques – sans oublier leur cortège de parasites –, accompagnent l'expansion des villes et des agglomérations sur l'ensemble des continents depuis des siècles.

Quel est alors l'impact des changements globaux sur la biodiversité locale et régionale, en composition et en nombre d'espèces ? Observe-t-on une réduction du nombre d'espèces à cette échelle,

telle que suggérée par leur érosion globale ? Récemment, Maria Dornelas, de l'université de Saint Andrews, au Royaume-Uni, et ses collègues ont exploré cette question en regroupant et analysant les résultats publiés d'une centaine de suivis temporels de la biodiversité locale ou régionale, réalisés dans une grande variété de biomes terrestres et aquatiques – de vastes milieux de vie tels que la toundra, la forêt tropicale, les récifs coralliens, répartis sur tout le globe –, et impliquant au total plus de 35 000 espèces animales et végétales.

Résultat : cette métaanalyse met bien en évidence un changement croissant dans la composition des communautés locales au fil du temps. Progressivement, des espèces « sensibles » disparaissent au profit d'autres mieux adaptées aux nouvelles conditions environnementales. En revanche, à la surprise des auteurs, l'étude ne montre aucune tendance générale au déclin de la biodiversité locale, mesurée principalement en nombre d'espèces. L'analyse révèle même, à l'inverse, un accroissement de la biodiversité locale dans les régions tempérées du Globe telles que l'Europe et l'Amérique du Nord...

Influencés par l'étonnement des chercheurs, plusieurs médias ont tiré cette conclusion : puisque la biodiversité locale ne diminue pas, la biodiversité reste élevée sur Terre, et la situation n'est donc pas si dramatique. Or l'un n'implique pas l'autre. Les variations locales du nombre d'espèces ne s'additionnent pas entre sites géographiques : le nombre total d'espèces d'une communauté mondiale n'est pas la somme des effectifs d'espèces locaux.

L'AUTEURE



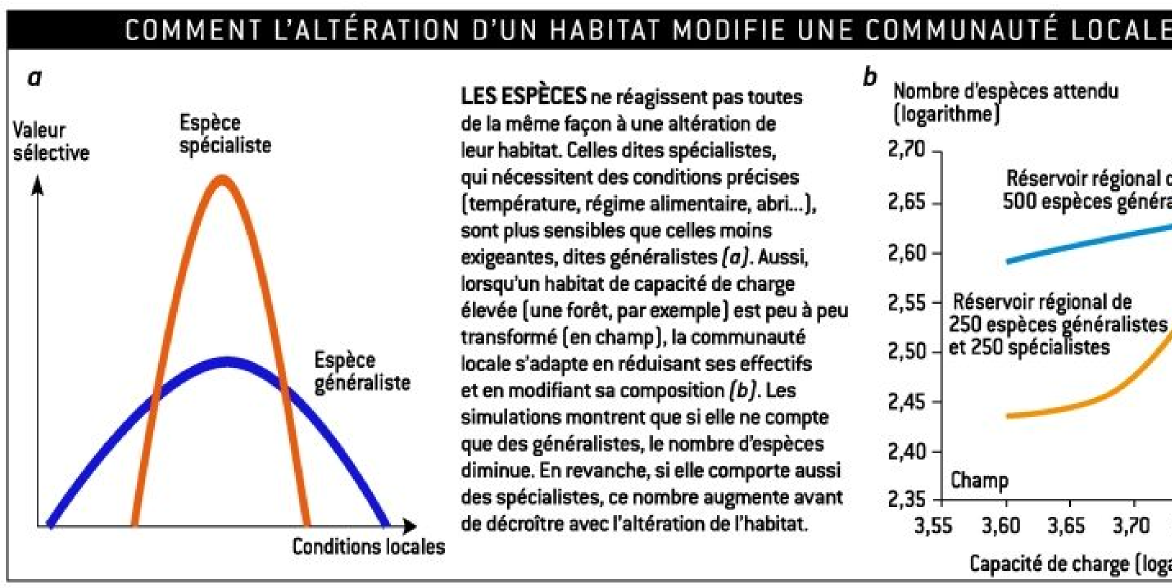
Anne TEYSSÈDRE est écologue, chercheuse associée au département Écologie et gestion de la biodiversité du Muséum national d'histoire naturelle, à Paris.

Mieux, la dynamique mise en évidence est même celle qu'attendaient les théoriciens de l'écologie. Depuis une vingtaine d'années, les chercheurs en écologie des communautés et en biogéographie étudient l'impact des activités humaines sur la structure, le fonctionnement et la dynamique de la biodiversité. Prenant en compte la diversité des interactions des espèces avec leur environnement, leur corpus théorique prévoit notamment que les changements environnementaux en cours produisent trois résultats sur les communautés animales et végétales : érosion de la biodiversité à l'échelle globale, dérive croissante de la composition des communautés locales et augmentation possible, dans un premier temps, de la biodiversité locale moyenne. En vérifiant ces deux derniers résultats, Maria Dornelas et ses collègues ont confirmé la justesse de cette théorie.

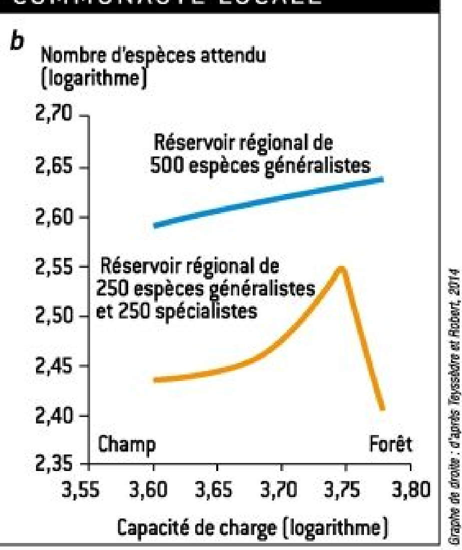
Spécialistes *versus* généralistes

La clé de la dynamique actuelle de la biodiversité réside en bonne partie dans le degré variable de spécialisation des espèces par rapport à leurs conditions de vie, et notamment à leur habitat. Selon la théorie de la niche écologique *(voir l'encadré page ci-contre)*, chaque espèce est caractérisable par ses exigences physiques et biologiques – conditions de température, hygrométrie, acidité, régime alimentaire, abri... Ensemble, ces exigences décrivent sa « niche écologique ». Les espèces aux exigences plus strictes sont dites spécialistes (de telle ressource, tel hôte ou type

COMMENT L'ALTÉRATION D'UN HABITAT MODIFIE UNE COMMUNAUTÉ LOCALE



LES ESPÈCES ne réagissent pas toutes de la même façon à une altération de leur habitat. Celles dites spécialistes, qui nécessitent des conditions précises (température, régime alimentaire, abri...), sont plus sensibles que celles moins exigeantes, dites généralistes *(a)*. Aussi, lorsqu'un habitat de capacité de charge élevée (une forêt, par exemple) est peu à peu transformé (en champ), la communauté locale s'adapte en réduisant ses effectifs et en modifiant sa composition *(b)*. Les simulations montrent que si elle ne compte que des généralistes, le nombre d'espèces diminue. En revanche, si elle comporte aussi des spécialistes, ce nombre augmente avant de décroître avec l'altération de l'habitat.



Graphe de droite : d'après Teyssèdre et Robert, 2014

d'habitat) ; c'est le cas des tariers des prés et des vanneaux huppés. Les espèces moins exigeantes (à large niche), dites généralistes, vivent et se reproduisent quant à elles dans des habitats variés. C'est le cas en Europe des mésanges charbonnières, merles noirs et corneilles, mais aussi des mulots sylvestres, belettes et hérissons, par exemple.

Sur le plan écologique et évolutif, la spécialisation est un compromis : étroitement adaptée à certaines conditions de vie précises, une espèce spécialiste est plus compétitive qu'une espèce généraliste dans un petit nombre d'habitats offrant ces conditions, mais l'est moins dans de nombreux autres habitats *(voir l'encadré page ci-contre)*. Elle est donc *a priori* plus sensible aux changements environnementaux qu'une espèce généraliste.

Face à l'ampleur des changements globaux en cours, la théorie écologique prévoit donc des dynamiques démographiques et évolutives différentes selon l'affinité des espèces à leur habitat. Des espèces généralistes (régionales et exotiques) se répandront et s'adapteront, de même que des espèces spécialistes des nouveaux habitats en expansion ; en revanche, faute d'adaptation, des espèces spécialistes des anciens habitats déclineront, de même que leurs hôtes, symbiontes et parasites spécifiques.

Au niveau d'intégration supérieur, cette double dynamique doit se traduire par une dérive progressive des communautés biologiques, comptant une fraction croissante d'espèces généralistes ou inféodées aux habitats anthropisés – dérive que confirment les mesures de Maria Dornelas et ses collègues. Les espèces généralistes étant communes à de nombreux habitats, cette dérive s'accompagne d'une homogénéisation des communautés régionales, confirmée depuis une quinzaine d'années chez de nombreux groupes systématiques, notamment au moyen de suivis temporels de la spécialisation des espèces et communautés. Ainsi, en Europe, les pigeons ramiers, corneilles, merles noirs, mésanges charbonnières et autres espèces généralistes représentent largement l'avifaune dans les régions d'agriculture intensive et les zones urbaines.

Paradoxalement, cette dynamique générale de dérive et d'homogénéisation n'implique pas forcément une réduction locale et régionale du nombre d'espèces, et cela même dans les communautés appauvries en nombre d'individus. En effet, en première approximation, le nombre d'espèces formant une communauté locale ou

La théorie de la niche écologique

L'étude de l'influence de l'environnement sur la distribution des populations et leur évolution n'est pas nouvelle. Au XIXe siècle, plusieurs naturalistes se sont intéressés aux relations entre les éléments d'un système naturel. Darwin, notamment, a apporté l'idée d'« économie de la nature » : tous les organismes occupent une place dans cette économie, à laquelle ils se sont adaptés par sélection naturelle.

La définition de la niche écologique utilisée aujourd'hui a été formulée en 1957 par le zoologue anglo-américain George Hutchinson, mais le concept de niche est très antérieur. Son invention est due au zoologiste américain Joseph Grinnell. En 1917, il rassembla sous ce nom tous les facteurs environnementaux qui conditionnent la vie d'une espèce : gammes de température, salinité, acidité, humidité, nutriments... L'écologue britannique Charles Elton reprit ce terme en 1927 dans son livre *Animal Ecology* avec une approche plus fonctionnelle. Il définit la niche principalement par le rôle de l'espèce dans sa communauté biologique au sens large (ce que l'on nommerait aujourd'hui son réseau écologique), notamment par sa place dans la chaîne alimentaire.

Dans les années 1930, à la suite d'une série d'études empiriques, le biologiste russe Georgyi Gause conclut que deux espèces occupant la même niche écologique ne peuvent coexister en un même habitat : l'espèce la moins adaptée aux conditions locales cède la place à sa compétitrice de valeur sélective supérieure. Hutchinson creusa la notion de niche pour formaliser et explorer le principe d'exclusion compétitive de Gause. La niche écologique devint un « hypervolume » à *n* dimensions, chacune correspondant à un paramètre descriptif de l'espèce en interaction avec son environnement. Il distingua deux types de niches : la niche fondamentale, ensemble des conditions écologiques dans lesquelles une population de l'espèce peut prospérer, et la niche réalisée, plus petite, correspondant à l'espace des paramètres que l'espèce est contrainte d'occuper du fait de la présence d'autres espèces. Selon son modèle, deux espèces peuvent coexister dans un même habitat si elles diffèrent au moins par une des composantes de leur niche réalisée.

Les observations cumulées depuis plus de cinquante ans suggèrent cependant que des communautés animales ou végétales comportent plusieurs espèces de niches écologiques très voisines (et donc dérogent au principe de Gause). Pour explorer cette coexistence, le biologiste américain Stephen Hubbell a proposé en 2001 une théorie neutre de la biodiversité et de la biogéographie, qui assume l'équivalence écologique (égalité de la valeur sélective) de tous les individus formant une communauté confrontée au hasard des événements démographiques (mutations, reproduction, migrations, mortalité...). Aujourd'hui, les modèles explorent la part de cette stochasticité démographique dans l'évolution des communautés par rapport à celle du déterminisme de niche.

– A. T.



© Ninelle/Shutterstock.com

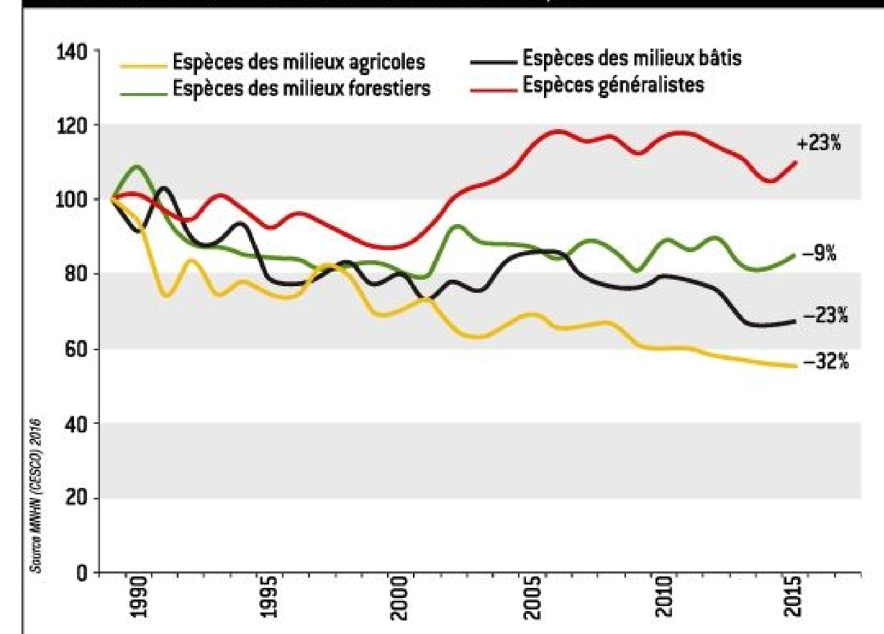
DEUX ESPÈCES DE LICHEN cohabitent sur ce mur dans deux niches écologiques distinctes correspondant à une exposition et une hygrométrie différentes.

régionale résulte d'un équilibre dynamique entre colonisations et extinctions. Ce nombre augmente si le taux d'immigration et d'installation de nouvelles espèces excède celui des extinctions locales, ou extirpations.

Au tournant du siècle, des chercheurs en biogéographie ont souligné que l'augmentation actuelle des flux d'espèces entre régions et provinces géographiques doit se solder par une augmentation de la biodiversité locale et régionale en nombre d'espèces. Depuis la fin des années 1990, cette augmentation s'est confirmée dans les îles océaniques, qui se sont considérablement « enrichies » en plantes, poissons d'eau douce et mammifères issus du continent (ou d'autres îles) depuis leur colonisation par les humains. La prévision est aussi vérifiée à un degré moindre, au moins pour les plantes, à l'échelle des continents: la diversité des plantes a ainsi augmenté d'environ 20% en Australie et aux États-Unis au cours des siècles derniers, par introduction (volontaire ou non) et adaptation locale d'espèces dites exotiques.

Les espèces exotiques ne forment cependant qu'une composante mineure des flux d'espèces entre sites d'une même région. Avec la modification généralisée des habitats et des écosystèmes (induite notamment par l'intensification de l'agriculture et le changement climatique), la perte de compétitivité des espèces spécialistes, dans les habitats modifiés, augmente la proportion de colonisation locale des espèces généralistes, que celles-ci soient régionales ou exotiques.

LE DÉCLIN DE L'HIRONDELLE RUSTIQUE



DEPUIS 1989, le programme de sciences participatives Vigie-Nature du Muséum national d'histoire naturelle coordonne un suivi temporel des oiseaux communs. L'évolution ainsi mesurée des effectifs des populations d'oiseaux communs en France métropolitaine *(ci-dessus rapportés à 100 en 1989)* montre que si les espèces généralistes prospèrent, les espèces spécifiques de certains milieux (agricoles, forestiers, bâtis) déclinent *(ci-dessus)*, tels le bouvreuil pivoine, l'hirondelle rustique ou le tarier des prés *(à droite)*.

Les espèces spécialistes d'habitats anciens disparaissent

La modélisation de métacommunautés non neutres, formées d'espèces généralistes et spécialistes, a ainsi montré qu'en deçà d'un certain seuil, la perturbation des habitats, leur altération et la réduction de leur capacité de charge (le nombre d'individus qu'ils peuvent accueillir par unité de surface) conduisent à une augmentation du nombre d'espèces locales et régionales *(voir l'encadré page 38)*. Plus d'espèces malgré une baisse du nombre total d'individus et, parmi elles, une proportion plus importante d'espèces généralistes… C'est ce qu'on observe aujourd'hui dans les régions agricoles d'Europe.

En résumé, le nombre d'espèces locales augmente dans les habitats modérément modifiés, où différentes catégories d'espèces – spécialistes des anciens habitats, généralistes ou spécialistes des habitats anthropisés – ont une valeur sélective comparable et peuvent donc coexister à l'échelle locale ou régionale. À court terme et de façon plus générale, ce nombre augmente partout où la colonisation par de nouvelles espèces, généralistes ou spécialistes de nouveaux habitats (riches en azote, par exemple), excède en nombre d'espèces la disparition de spécialistes d'habitats anciens. Une situation *a priori* fréquente dans la période actuelle de changements globaux, puisque la colonisation d'un habitat par de nouvelles espèces augmente vite le nombre d'espèces observées, tandis que la disparition locale (ou extirpation) d'espèces est un processus lent, parfois sur plusieurs décennies.

Au-delà d'un certain seuil de modification, les écosystèmes basculent vers un autre état stable de structure et de mode de fonctionnement sont très différents, souvent moins riche en biodiversité. Par exemple, le déversement excessif de nitrates dans un lac ou une rivière initialement bien oxygénés et riches en biodiversité, notamment en poissons, fait basculer l'écosystème vers un nouvel état stable pauvre en oxygène et en poissons, mais riches en algues et bactéries. De même, une aridification du climat local ou régional peut faire basculer une forêt subtropicale en savane, ou une forêt tempérée en prairie, avec une réduction rapide du nombre d'espèces et de la biomasse, du fait de la moindre capacité de charge des habitats ouverts.

Des régions appauvries aux faibles latitudes

L'équipe de Maria Dornelas a observé une augmentation moyenne de la biodiversité locale en région tempérée, mais pas en région tropicale. Cela suggère que le basculement d'écosystèmes riches en biodiversité vers un état stable appauvri est actuellement plus fréquent aux faibles latitudes. De fait, la déforestation pour l'agriculture n'est plus une activité importante en Europe ou en Amérique du Nord, mais bien en Asie du Sud, en Amérique du Sud et en Afrique, où elle menace nombre d'espèces inféodées aux forêts tropicales. De même, le basculement de récifs coralliens riches en espèces animales vers un état très appauvri dominé par les algues, en réponse à l'acidification de l'eau et à la hausse des teneurs en nitrates, concerne les régions tropicales et subtropicales.

Espèces / Effectifs	Depuis 1989	Depuis 2001	Ces dix dernières années
Pigeon ramier (espèce généraliste)	+169%	+52%	+34%
Bouvreuil pivoine (espèce des milieux forestiers)	−64%	−38%	−35%
Hirondelle rustique (espèce des milieux bâtis)	−39%	−18%	−24%
Tarier des prés (espèce des milieux agricoles)	−57%	−43%	−37%

© Shutterstock.com

Aux latitudes élevées, en revanche, le basculement – et le déplacement global vers les pôles – d'écosystèmes terrestres relativement froids et pauvres en biodiversité exposés à des températures croissantes doit théoriquement s'accompagner d'un enrichissement des communautés terrestres locales et régionales, tant en nombre d'espèces qu'en abondance d'individus. Ainsi, dans les décennies à venir, les terres gelées du Groenland devraient se transformer localement en toundras, les toundras du nord du Canada et de la Russie laisser place à la forêt boréale, les franges méridionales de cette dernière se changer en forêts tempérées ou en prairies (selon l'hygrométrie locale), peuplées d'espèces généralistes et spécialistes venues d'habitats voisins.

À l'échelle planétaire, ces dynamiques de dérive des communautés locales et régionales conduisent à une perte nette d'espèces spécialistes ou davantage exposées aux pressions humaines (les espèces chassées, par exemple). En d'autres termes, l'augmentation ou le maintien du nombre d'espèces des communautés locales cachent leur appauvrissement généralisé en espèces spécialistes ou vulnérables, symptôme du déclin mondial de la biodiversité.

Ainsi, la divergence des dynamiques de biodiversité locale et globale que Maria Dornelas et ses collègues ont mise en évidence est cohérente avec la théorie. En déclarant leur surprise devant l'absence de déclin moyen du nombre d'espèces locales, les chercheurs ont jeté un voile sur la cohérence des résultats et favorisé la diffusion, auprès des citoyens et décideurs, d'un message optimiste sur la « résilience de la biodiversité », suggérant que les changements actuels de biodiversité à l'échelle locale seraient neutres et anodins. Cette interprétation est fausse. Ces changements impliquent de multiples disparitions d'espèces ainsi que des pertes génétiques et fonctionnelles aux échelles locale, régionale et globale, indétectables par de simples suivis du nombre d'espèces.

Une loi nécessaire

Les enjeux des changements environnementaux associés à l'expansion humaine sont considérables tant sur le plan éthique qu'écologique. Notamment, les espèces généralistes en expansion ne sont pas omnipotentes. Rien n'assure que le remplacement d'espèces spécialistes par des généralistes dans des écosystèmes soumis à des « forçages » physiques, chimiques et biologiques croissants produira des écosystèmes stables et fonctionnels, ni même que toutes leurs fonctions seront maintenues. Rien, non plus, n'interdit leur basculement vers un régime défavorable aux sociétés humaines.

Face à ce constat, les recherches sur la résilience des communautés et réseaux écologiques sont plus que jamais nécessaires. Et devant l'ampleur des enjeux liés à leur dynamique actuelle, l'urgence pour les sciences de la conservation est d'aider les sociétés à réduire leurs pressions sur les écosystèmes dont elles dépendent. En d'autres termes, de favoriser l'adoption de mesures et modes de vie ménageant la biodiversité et le fonctionnement des (socio)écosystèmes.

Bien que d'ambition limitée, le projet de loi sur la biodiversité ballotté entre l'Assemblée nationale et le Sénat depuis janvier 2016 va dans ce sens, notamment les points en discussion tels que la taxe sur l'huile de palme et l'interdiction des produits phytosanitaires contenant des néonicotinoïdes, néfastes aux insectes. Il serait regrettable que cette loi soit dénaturée et retardée. Et tout message ambigu ou rassurant sur la dynamique actuelle de la biodiversité ne fait que nous ralentir encore. ■

■ BIBLIOGRAPHIE

M. Dornelas *et al.*, **Assemblage time series reveal biodiversity change but not systematic loss**, *Science*, vol. 344, pp. 296-299, 2014.

A. Teyssèdre et A. Robert, **Contrasted effects of habitat reduction, conversion and alteration on neutral and non neutral biological communities**, *Oikos*, vol. 123, pp. 857-865, 2014.

I. Le Viol *et al.*, **More and more generalists : Two decades of changes in the European avifauna**, *Biol. Lett.*, vol. 8, pp. 780–782, 2012.

J. Clavel *et al.*, **Worldwide decline of specialist species : Toward a global functional homogenization ?**, *Front. Ecol. Environ.*, vol. 9, pp. 222-228, 2011.

R. Barbault et A. Teyssèdre, **Invasions d'espèces : Cause ou conséquence de la perturbation des écosystèmes ?**, *Pour la Science*, n° 376, février 2009.

La révolution de **l'apprentissage profond**

Yoshua Bengio

Reconnaître un visage, compléter une phrase, gagner au jeu de go... Après plusieurs décennies de déconvenues, les machines intelligentes deviennent enfin réalité – grâce à des réseaux de plusieurs couches de neurones artificiels.

Les ordinateurs ont suscité beaucoup d'enthousiasme et d'attentes dans les années 1950, quand ils ont commencé à battre au jeu de dames certains amateurs de bon niveau. Dans les années 1960, les chercheurs espéraient reproduire les fonctions du cerveau humain avec un ordinateur et des programmes informatiques. L'« intelligence artificielle » égalerait alors les performances humaines pour tous les types de tâches. En 1967, le spécialiste Marvin Minsky, du MIT (l'Institut de technologie du Massachusetts), affirmait que les défis de l'intelligence artificielle seraient résolus en une génération.

Cet optimisme était prématuré. Les logiciels de l'époque visant à aider les médecins à établir de meilleurs diagnostics et les réseaux modélisés d'après le cerveau humain pour reconnaître le contenu de photographies n'ont pas tenu les promesses de l'engouement initial. Les algorithmes étaient trop simples et manquaient de données, nécessaires pour parfaire leur apprentissage. La puissance de traitement informatique était également insuffisante pour faire tourner des machines capables de mener à bien les calculs complexes nécessaires à l'imitation, même approximative, des subtilités de la pensée humaine.

Au milieu des années 2000, le rêve de construire des machines aussi intelligentes que des humains avait presque été abandonné

L'ESSENTIEL

- L'intelligence artificielle telle qu'on l'imaginait dans les années 1950 a été plus difficile à développer que prévu.
- Depuis quelques années, le domaine a connu un grand renouveau avec les techniques de l'apprentissage profond, inspirées des réseaux de neurones du cerveau.
- Un réseau de neurones artificiels à apprentissage profond acquiert sans cesse de l'expertise à partir de nouvelles données.
- Un tel réseau a déjà battu un joueur de go professionnel, d'autres reconnaissent des images ou la parole...

© Shutterstock.com-Pour la Science



par la communauté scientifique. À cette époque, même le terme d'«intelligence artificielle» semblait avoir déserté le domaine de la science sérieuse. Les chercheurs décrivent la période allant des années 1970 au milieu des années 2000 par l'expression «AI winters», une sorte de long hiver glaciaire de l'intelligence artificielle où tous les espoirs avaient été brisés.

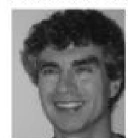
Les choses ont commencé à basculer en 2005. Les perspectives dans le domaine de l'intelligence artificielle ont radicalement changé avec l'apprentissage automatique et l'émergence de l'«apprentissage profond», qui revisite le connexionnisme des années 1960 et s'inspire des neurosciences. Les réalisations actuelles de l'apprentissage profond sont à la hauteur des promesses d'antan, et les grandes entreprises des technologies de l'information consacrent désormais des milliards de dollars ou d'euros à son développement.

Par apprentissage profond, on entend un traitement effectué par un grand nombre de neurones artificiels (imitant de façon très simplifiée les neurones biologiques) qui, par leurs interactions, permettent au système d'apprendre progressivement à partir d'images, de textes ou d'autres données. L'apprentissage repose sur des principes mathématiques généraux. Le résultat de l'apprentissage est une représentation (par exemple, «Cette image contient des éléments différents»), une décision (par exemple «Cette image représente Jeanne Dupont») ou une transformation (par exemple la traduction d'un texte dans une autre langue).

La technique de l'apprentissage profond a transformé la recherche en intelligence artificielle, ranimant des ambitions oubliées pour la vision par ordinateur, la reconnaissance automatique de la parole et la robotique. Les premières applications ont vu le jour en 2012 pour la compréhension de la parole (vous avez certainement entendu parler de Siri, qui équipe les iPhone). Et peu après sont arrivés des logiciels qui identifient le contenu d'une image, une fonctionnalité qu'intègre maintenant le moteur de recherche Google Photos.

Tous ceux qui sont frustrés par les menus malcommodes de leur téléphone peuvent apprécier les avantages d'utiliser Siri ou

■ L'AUTEUR


Yoshua BENGIO est professeur d'informatique à l'université de Montréal. Il est l'un des pionniers du développement des méthodes d'apprentissage profond.

Dans les années 1960 les chercheurs pensaient résoudre les problèmes de l'intelligence artificielle en moins d'une génération

un autre «assistant personnel» sur leur appareil. Et pour ceux qui se rappellent combien la reconnaissance d'objets était mauvaise il y a quelques années seulement (les logiciels confondaient un aspirateur et un tatou, par exemple), les avancées dans le domaine de la vision artificielle ont été phénoménales: aujourd'hui, moyennant certaines conditions, les ordinateurs savent reconnaître sur des images un chat, une pierre ou des visages presque aussi bien que les humains. Les logiciels d'intelligence artificielle font désormais partie du quotidien de millions d'utilisateurs de téléphones. Personnellement, je n'écris plus de messages: je parle simplement à mon téléphone, et parfois il lui arrive même de me répondre.

Ces progrès ont ouvert la voie à de nouvelles réalisations de ces techniques, à des applications commercialisées, et l'intérêt ne cesse de croître. La concurrence fait rage entre les entreprises pour attirer les jeunes talents; les titulaires d'un doctorat en apprentissage profond sont une denrée rare très convoitée. De nombreux professeurs d'université spécialistes du domaine (la majorité, d'après certaines estimations) sont passés du milieu académique à l'industrie, séduits par des équipements de pointe et par de généreux salaires.

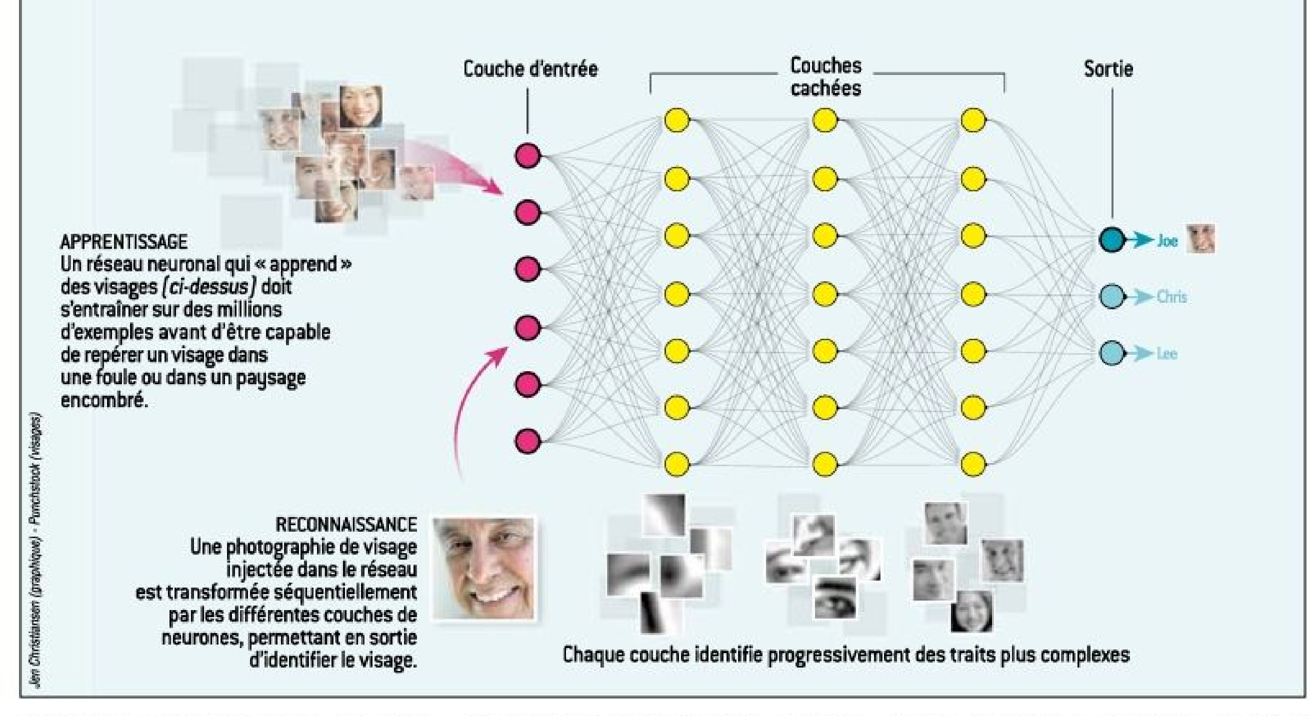
Les efforts déployés pour répondre aux défis de l'apprentissage profond ont débouché sur des réussites époustouflantes. La très récente victoire au go d'un réseau neuronal sur le joueur professionnel Lee Sedol a fait la une de nombreux journaux *(voir la figure page 47)*. Les applications vont s'étendre à d'autres domaines de l'expertise humaine, et pas seulement aux jeux. Par exemple, un algorithme d'apprentissage profond nouvellement développé serait capable de diagnostiquer des insuffisances cardiaques sur des images d'IRM aussi bien qu'un cardiologue.

Ce succès récent de l'apprentissage profond a de quoi surprendre quand on se penche sur l'histoire de l'intelligence artificielle. Pourquoi celle-ci a-t-elle buté sur tant d'obstacles dans les décennies précédentes? Parce qu'apprendre des choses nouvelles est, pour une machine, difficile. L'essentiel de la connaissance que nous

DES RÉSEAUX DE NEURONES QUI DÉVELOPPENT LEUR EXPERTISE

Les connexions entre neurones dans le cortex cérébral ont inspiré la création d'algorithmes d'apprentissage qui imitent ces liens complexes. On peut apprendre à un tel réseau de neurones artificiels à reconnaître un visage en l'entraînant avec un très grand nombre d'images. Le réseau détermine les traits qui lui permettent de distinguer un visage d'une main, par exemple, et reconnaît la présence de visages dans une image. Il utilise ensuite cette connaissance pour identifier des visages qu'il a déjà vus, même si l'image de la personne est un peu différente de celle sur laquelle il s'est entraîné.

Pour reconnaître un visage dans une image, le réseau commence par analyser les pixels d'une image qui lui est présentée au niveau de la couche d'entrée. Puis il discerne les formes géométriques caractéristiques du visage au niveau de la couche suivante. En remontant la hiérarchie, des yeux, une bouche et d'autres traits du visage apparaissent. Enfin, une forme composite émerge et le réseau tente de « deviner » au niveau de la couche de sortie s'il s'agit du visage de Joe, Chris ou Lee.



Jen Christiansen (graphique) - Punchstock (visages)

avons du monde autour de nous n'est pas formalisé dans un langage écrit sous forme d'un ensemble de tâches explicites, ce qui est indispensable pour écrire un programme informatique. C'est pourquoi nous n'avons pas pu directement programmer un ordinateur pour effectuer la plupart des tâches qui nous sont évidentes ou faciles, qu'il s'agisse de comprendre la parole, d'interpréter des images ou de conduire une automobile. Les tentatives en ce sens (organiser des ensembles de faits en bases de données élaborées afin de doter les ordinateurs d'un fac-similé d'intelligence) ont rencontré peu de succès.

C'est là qu'entre en scène l'apprentissage automatique – le cadre général de l'apprentissage profond. Il se fonde sur des principes généraux, permettant aux systèmes d'utiliser les données disponibles pour apprendre à bien décider, à acquérir de bonnes connaissances et, in fine, à rechercher de nouvelles données pour apprendre mieux. Mais qu'est-ce qu'une « bonne » décision ? Pour les animaux, au regard des principes de l'évolution, les décisions qui sont prises devraient être celles qui optimisent les chances de survie et de reproduction. Dans les sociétés humaines, une bonne décision est plus subtile à définir et peut inclure des interactions sociales qui confèrent un statut élevé ou une sensation de bien-être. Pour une voiture autonome, qui se conduit toute seule, la qualité de la prise de décision sera d'autant meilleure que le véhicule reproduira avec fidélité les comportements de bons conducteurs humains.

Les connaissances nécessaires pour prendre une bonne décision dans un contexte particulier ne sont pas nécessairement évidentes et faciles à traduire en langage informatique. Une souris, par exemple, connaît bien son environnement et a un sens inné des endroits où elle doit flairer, sait instinctivement comment bouger ses pattes, trouver de la nourriture, éviter les prédateurs... Aucun informaticien ne serait capable de spécifier un programme étape par étape pour produire ces comportements. Et pourtant, ces connaissances sont codées dans le cerveau du rongeur.

Apprendre à partir de nombreux exemples

Avant de créer des ordinateurs capables d'apprendre, les scientifiques doivent répondre à des questions fondamentales, concernant en particulier le partage entre l'inné (ce qui fait partie du système dès le départ) et l'acquis (ce que le système apprend à partir de son expérience). Depuis les années 1950, les chercheurs ont étudié et tenté d'affiner les principes généraux qui permettent aux animaux et aux humains (ainsi que, en l'occurrence, aux machines) d'acquérir des connaissances par expérience. L'apprentissage automatique vise

à établir des procédures, nommées algorithmes d'apprentissage, qui confèrent à une machine la capacité d'apprendre à partir d'exemples qu'on lui présente.

La science de l'apprentissage automatique fait face à un résultat négatif formel surnommé *No free lunch* (« Rien n'est gratuit »): si tous les problèmes sont équiprobables, il n'existe pas d'algorithme universel, c'est-à-dire meilleur que tous les autres sur l'ensemble des problèmes. Il faut donc élaborer des algorithmes différents pour s'attaquer à différentes catégories de problèmes (par exemple reconnaître un coucher de soleil ou traduire un texte en ourdou). L'apprentissage automatique repose ainsi sur deux piliers, théorique et expérimental: un problème réel ne satisfait pas toujours les hypothèses théoriques de l'algorithme, et la validation de l'algorithme sur des données réelles est toujours nécessaire.

Les réseaux de neurones à apprentissage profond s'inspirent de la structure en couches multiples du cortex visuel, la partie du cerveau qui traite les signaux venant des yeux

Or il semble que notre cerveau incorpore des algorithmes généraux qui nous permettent d'apprendre une multitude de tâches auxquelles l'évolution n'avait pas préparé nos ancêtres: jouer aux échecs, construire des ponts ou faire de la recherche en intelligence artificielle.

Ces compétences supplémentaires suggèrent que l'intelligence humaine pourrait encore être source d'inspiration pour créer des machines dotées d'une forme d'intelligence générale. C'est exactement pourquoi les développeurs de réseaux de neurones ont adopté le modèle du cerveau comme guide pour concevoir des systèmes intelligents.

Les principales unités de calcul du cerveau sont des cellules nommées neurones. Un neurone transmet un signal sous la forme d'une impulsion électrique qui se propage jusqu'à la synapse, la zone de contact avec un autre neurone. Des molécules nommées neurotransmetteurs sont libérées, puis réabsorbées par le neurone cible, ce qui permet à ce dernier de prendre le relais. La propension d'un neurone à transmettre un signal vers un autre neurone est nommée force synaptique. À mesure qu'un neurone « apprend », sa force synaptique augmente, et il a plus de chances d'envoyer des signaux à ses voisins quand il est stimulé par une impulsion électrique.

Les neurosciences ont influencé l'émergence des réseaux de neurones artificiels, où ces éléments sont connectés de façon matérielle ou logicielle. Les premiers programmeurs de cette sous-discipline de l'intelligence artificielle, connue sous le nom de connexionnisme, postulaient que les réseaux neuronaux seraient capables d'apprendre des tâches complexes en modifiant progressivement les connexions entre neurones, de telle façon que les schémas d'activité neuronale coderaient le contenu des données – livrées sous forme d'images, de sons ou autres. À chaque exemple soumis au réseau, le processus d'apprentissage se poursuivrait en modifiant les forces synaptiques entre les neurones connectés. Ces valeurs convergeraient petit à petit vers la configuration du réseau qui représente le mieux, par exemple, le contenu d'images d'un coucher de soleil.

Du cerveau aux réseaux virtuels

Les réseaux de neurones actuels sont des versions améliorées des travaux pionniers issus du connexionnisme. Cependant, les algorithmes d'apprentissage correspondants requièrent une participation active de l'homme. La plupart d'entre eux utilisent une technique, nommée apprentissage supervisé, où chaque exemple d'apprentissage est accompagné d'une étiquette indiquant ce qui fait le sujet de l'apprentissage (une image de coucher de soleil, par exemple, est associée à l'étiquette « coucher de soleil »).

Dans ce cas, l'objectif de l'algorithme d'apprentissage supervisé est, à partir d'une donnée d'entrée constituée par une photographie, de produire comme sortie le nom de l'objet central de l'image. L'opération mathématique qui transforme une entrée en une sortie est une fonction. Les valeurs numériques qui définissent cette fonction, telles que les forces synaptiques, correspondent à une solution de la tâche d'apprentissage.

Il serait facile pour un système d'apprendre par cœur les réponses correctes

Apprentissage profond et étude de l'ADN

Dans le domaine de la génomique, l'accumulation de données nécessite des algorithmes puissants pour en extraire des informations. En 2015, Brendan Frey, de l'université de Toronto, et ses collègues ont développé DeepBind, un logiciel qui recourt à l'apprentissage profond pour analyser la façon dont des protéines se lient à l'ADN et à l'ARN. Les chercheurs détectent ainsi des mutations qui perturbent les processus cellulaires entraînant des maladies.

sur les exemples connus (il suffit d'une mémoire de capacité suffisante). Mais cela n'a pas grand intérêt. Même si on accumule des millions d'images de coucher de soleil, le nombre d'images possibles d'une telle scène est infini. Ainsi, l'objectif de l'apprentissage est d'être capable de donner de bonnes réponses sur de nouveaux exemples, inconnus du système, en généralisant les exemples connus. Le bon niveau de généralisation dépend du contexte. Ainsi, on peut vouloir reconnaître la notion d'arbre en général, mais on peut aussi vouloir distinguer les chênes des hêtres, ou vouloir reconnaître le hêtre d'un jardin donné...



© Google

LA MACHINE GAGNE AU JEU DE GO.
En mars 2016, le logiciel AlphaGo a affronté le joueur coréen, Lee Sedol, considéré comme l'un des meilleurs du monde *(ci-dessus au milieu, avec Sergei Brin, cofondateur de Google, et Demis Hassabis, cofondateur de Google DeepMind qui a développé AlphaGo)*. Fondé sur l'apprentissage profond, AlphaGo a battu l'humain quatre manches à une *(ci-contre, la seule partie gagnée par Lee Sedol)*.

Une structure faite de couches multiples

Un tel algorithme doit aussi s'appuyer sur certaines hypothèses relatives aux données et à ce que pourrait être une solution possible à un problème donné. Par exemple, le logiciel doit intégrer comme principe que si des données d'entrée d'une fonction particulière sont semblables, leur sortie ne devrait pas être radicalement différente : modifier quelques pixels sur une image de chat ne devrait pas transformer l'animal en chien.

De telles hypothèses faites sur des images sont utilisées par les réseaux de neurones dits convolutifs. Ces programmes sont à l'origine du renouveau de l'intelligence artificielle. Les réseaux neuronaux convolutifs utilisés dans l'apprentissage profond comprennent de nombreuses couches de neurones organisées de telle manière que le logiciel sera robuste vis-à-vis des changements dans l'objet qu'il tente d'analyser. Il sera capable de reconnaître l'élément même s'il a un peu bougé par exemple. Ainsi, un réseau bien entraîné sera capable de reconnaître un visage que les photographies représentent sous des angles variés.

La configuration d'un réseau convolutif s'inspire de la structure en couches multiples du cortex visuel, c'est-à-dire la partie de notre cerveau qui reçoit les signaux des yeux. Ces nombreuses couches de neurones virtuels justifient le qualificatif de « profond » donné à ces réseaux et confèrent à ces derniers une meilleure capacité à appréhender le monde environnant.

L'apprentissage profond est devenu envisageable il y a une dizaine d'années grâce à certaines innovations, alors que l'intérêt pour l'intelligence artificielle était au plus bas. Un organisme canadien financé par le gouvernement et par des fonds privés, l'ICRA (Institut canadien de recherches avancées), a contribué à ranimer la flamme en soutenant un programme dirigé par Geoffrey Hinton, de l'université de Toronto, et dont faisaient partie Yann LeCun de l'université de New York et du centre de recherche de Facebook à Paris, Andrew Ng de l'université de Stanford, Bruno Olshausen de l'université de Californie à Berkeley, moi-même et plusieurs autres. En raison du scepticisme ambiant, il était difficile à cette époque de publier des articles sur le sujet et même de persuader des étudiants de faire leur thèse dans ce domaine. Mais nous étions convaincus qu'il fallait persévérer dans cette voie.

La réticence vis-à-vis de l'intelligence artificielle découlait initialement de l'idée que la création de réseaux neuronaux était sans espoir à cause de la difficulté à optimiser leur performance pour apprendre efficacement.

L'optimisation est une branche des mathématiques qui vise à trouver la meilleure combinaison de paramètres, ici les poids synaptiques des neurones virtuels, pour atteindre un certain objectif. Lorsque la relation qui lie les paramètres et l'objectif est assez simple – plus précisément lorsque l'objectif est une « fonction convexe » des paramètres – alors on peut améliorer progressivement les paramètres et l'on parle d'optimisation convexe. La procédure d'entraînement est répétée jusqu'à ce que les paramètres s'approchent aussi près que possible des valeurs qui produisent le meilleur résultat. On cherche en fait un minimum global, à savoir le jeu de paramètres qui permet d'atteindre la valeur la plus basse (et la meilleure) de l'écart à l'optimum.

Des obstacles surmontés peu à peu

En général, la situation n'est pas aussi simple, la fonction reliant les paramètres à l'objectif qu'ils atteignent n'étant pas convexe. Or l'optimisation non convexe représente un défi bien plus difficile. De nombreux chercheurs pensaient qu'il n'était pas possible de le relever. L'algorithme d'apprentissage pourrait en effet se retrouver coincé dans un minimum local, d'où il ne pourrait sortir s'il ajuste les paramètres par petites touches.

Or mes collègues et moi avons montré que si le réseau de neurones est assez grand, le problème des minima locaux est fortement

QUAND L'APPRENTISSAGE PROFOND FAIT DE L'ART PSYCHÉDÉLIQUE

L'apprentissage profond est performant pour la reconnaissance d'objets dans une image, mais il est en réalité assez difficile de comprendre ce qui se passe au cours de l'analyse à chaque niveau du réseau de neurones. La société Google a développé le logiciel DeepDream qui utilise l'apprentissage profond. Les chercheurs peuvent analyser le résultat à différentes étapes du processus en demandant au logiciel de faire ressortir ce qu'il « voit » dans l'image. Ainsi, telles des paréidolies – l'illusion de voir, par exemple, un chien dans un nuage qui en a vaguement la forme –, le logiciel, qui s'est, par exemple, entraîné à reconnaître des images d'animaux, verra des oiseaux et des rongeurs dans une photographie d'un champ de maïs. Chacun peut créer ses propres images psychédéliques sur le site Deepdreamgenerator.com.



© Stoonn/Shutterstock.com



© Deepdreamgenerator.com

réduit. Dans un tel réseau, la plupart des minima locaux correspondent à un niveau d'apprentissage quasi équivalent à celui du minimum global.

Bien que les problèmes théoriques de l'optimisation soient, en principe, résolubles, la construction de grands réseaux comportant plus de deux ou trois couches avait souvent échoué. À partir de 2005, les recherches financées par l'ICRA ont commencé à porter leurs fruits et les obstacles ont été surmontés progressivement. En 2006, nous sommes parvenus à entraîner des réseaux neuronaux plus profonds en utilisant une technique qui opérait couche par couche.

Du bruit pour un meilleur apprentissage

Par la suite, en 2011, nous avons trouvé un moyen d'entraîner des réseaux encore plus profonds (avec davantage de couches de neurones virtuels) en modifiant les opérations effectuées par chacun des neurones, ce qui les rapprochait davantage des neurones biologiques dans leur façon de traiter l'information. Nous avons aussi découvert qu'en injectant du bruit aléatoire dans les signaux transmis entre les neurones au cours de l'apprentissage – comme ce qui a cours dans le cerveau –, les réseaux apprenaient mieux à identifier correctement une image ou un son.

Par ailleurs, deux facteurs essentiels ont contribué au succès des techniques d'apprentissage profond. Le premier est l'augmentation d'un facteur 10 de la puissance de calcul des ordinateurs grâce aux processeurs dédiés au traitement d'image (conçus initialement pour les jeux vidéo !), ce qui a permis d'entraîner des réseaux plus grands en un temps raisonnable. Le second facteur est que l'on avait désormais accès à d'énormes bases de données étiquetées, avec lesquelles les algorithmes d'apprentissage ont pu s'exercer à reconnaître un « chat », par exemple, dans des images qui comportaient un chat parmi d'autres éléments.

Une autre raison aux récents succès de l'apprentissage profond est que le réseau est capable d'apprendre à effectuer un ensemble de calculs qui construisent ou analysent pas à pas une image, un son ou un autre type de donnée. Avec une profondeur suffisante, ces dispositifs excellent dans beaucoup de tâches de reconnaissance visuelle ou auditive. Des travaux théoriques et expérimentaux récents ont d'ailleurs montré qu'il est impossible d'effectuer efficacement certaines de ces opérations mathématiques sans un réseau assez profond.

Mais que se passe-t-il au cœur du réseau de neurones profond ? Chaque couche transforme son entrée et produit une sortie qui est envoyée à la couche suivante *(voir l'encadré page 45)*. Les premières couches se concentrent sur les détails aux échelles les plus petites, puis les couches suivantes agrandissent les échelles considérées. Plus les couches sont profondes, plus elles vont représenter des concepts abstraits. Par exemple, les premières couches pourraient isoler des éléments caractéristiques d'une chaise et l'image de la chaise pourrait émerger du traitement de neurones d'une couche plus profonde, même si le concept de « chaise » ne faisait pas partie des étiquettes de catégorie sur lesquelles le réseau s'est entraîné. Et le concept de chaise pourrait lui-même n'être qu'une étape intermédiaire vers la création d'un concept encore plus abstrait au niveau d'une couche plus profonde, que le réseau pourrait catégoriser comme une « scène de bureau ».

Jusqu'à récemment, les réseaux de neurones artificiels se distinguaient en grande partie par leur capacité à effectuer des tâches telles que la reconnaissance de motifs dans des images statiques. Mais d'autres types de réseaux neuronaux affichent des résultats intéressants sur des événements dynamiques. Les « réseaux neuronaux récurrents », par exemple, ont démontré leur capacité à effectuer une séquence de calculs pour traiter la parole ou de la vidéo. Les données séquentielles sont constituées d'unités (phonèmes ou mots dans le cas de la parole) qui se suivent. La

façon dont les réseaux neuronaux récurrents traitent leurs entrées présente une certaine ressemblance avec la façon de fonctionner du cerveau. Les signaux qui se propagent parmi les neurones changent constamment à mesure que les entrées sensorielles sont traitées.

Un traitement dynamique

Les réseaux récurrents parviennent à prédire quel sera le mot suivant dans une phrase et peuvent ainsi produire une nouvelle séquence de mots, l'un après l'autre. Ils peuvent aussi s'atteler à des tâches plus complexes. Après avoir « lu » tous les mots d'une phrase, le réseau est à même de deviner le sens de la phrase entière. Un réseau récurrent distinct peut alors utiliser le traitement sémantique du premier réseau pour traduire la phrase dans une autre langue.

La recherche sur les réseaux neuronaux récurrents a connu sa propre période de stagnation à la fin des années 1990 et au début des années 2000. Mes propres travaux théoriques suggéraient qu'ils rencontreraient des difficultés à apprendre à récupérer de l'information du passé lointain, à savoir les premiers éléments de la séquence en cours de traitement (un peu comme si vous essayiez de réciter les premières phrases d'un livre alors que vous venez d'atteindre la dernière page). Mais certains de ces problèmes ont été résolus grâce à des techniques consistant à stocker l'information de façon à ce qu'elle persiste durablement. Ces réseaux neuronaux utilisent la mémoire temporaire (mémoire cache) d'un ordinateur pour traiter des informations multiples et dispersées, comme des idées contenues dans différentes phrases réparties au fil d'un document.

Le retour en force des réseaux neuronaux à apprentissage profond après le long sommeil de l'intelligence artificielle n'est pas uniquement un triomphe technique. C'est aussi une leçon de sociologie des sciences. En particulier, il souligne la nécessité de soutenir des idées qui font fi du *statu quo* technologique et d'encourager la tenue d'un portefeuille de recherches diversifié, laissant de la place à des champs provisoirement passés de mode. ■

■ BIBLIOGRAPHIE

Y. LeCun *et al.*, **Deep learning,** *Nature*, vol. 521, pp. 436-444, 2015.

Y. Bengio *et al.*, **Representation learning : A review and new perspectives,** *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 35(8), pp. 1798-1828, 2013.

A. Krizhevsky *et al.*, **ImageNet classification with deep convolutional neural networks,** *26th Annual Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS 2012)*, 2012.

■ SUR LE WEB

Cours de Yann LeCun au Collège de France, 2015-2016 : https://www.college-de-france.fr/site/yann-lecun/index.htm

La frappe éclair



LES SQUILLES, OU CREVETTES-MANTES, sont des crustacés dotés d'appendices « ravisseurs », c'est-à-dire spécialisés pour la capture de proies. Cette squille multicolore *(Odontodactylus scyllarus)* arbore une paire d'appendices en marteau au moyen desquels elle brise les coquilles d'escargots marins.

de la crevette-mante

Sheila Patek

Dans le monde vivant, ce ne sont pas les guépards ou les poissons qui détiennent les records de vitesse ou d'accélération. Les crevettes-mantes, les cellules urticantes des méduses ou les mandibules de certaines fourmis font bien mieux. Parfois sans muscles !

L'ESSENTIEL

- **Certains crustacés assènent avec leurs appendices des coups fulgurants, assez puissants pour fracasser des escargots marins.**
- **Ces frappes ultrarapides mettent en œuvre l'accumulation relativement lente d'énergie élastique, puis son relâchement brusque.**
- **De tels mécanismes se rencontrent chez quelques autres organismes.**
- **Des limitations qui leur sont inhérentes expliquent pourquoi ils ne sont pas plus répandus.**

Il y a une dizaine d'années, quand j'étais postdoctorante dans le laboratoire de Roy Caldwell, à l'université de Californie à Berkeley, j'ai commencé à étudier la squille multicolore *(Odontodactylus scyllarus)*, nommée aussi crevette-mante paon. C'est un crustacé prédateur qui fracasse les escargots marins au moyen d'un appendice en forme de marteau.

Son comportement était fascinant à observer. La squille palpe l'escargot, le fait tourner en tous sens et le met en position. Juste avant de lui porter un coup, elle touche la surface de sa coquille avec ses antennules, peut-être pour se faire une idée de la position et de la surface de sa cible. Après ce qui pourrait se comparer chez les humains à une grande inspiration avant un plongeon, la crevette-mante frappe. Le coup lui-même est trop rapide pour être distingué à l'œil nu, mais on entend un fort claquement, et des débris de coquille apparaissent sur le substrat.

Et le cycle recommence : palpation, manipulation, positionnement, toucher, « inspiration », et un autre coup invisible mais bien audible. Quand le mollusque est dépouillé de sa coquille et que la crevette-mante peut enfin le déguster, le silence s'installe dans l'aquarium.

En fait, j'étais témoin de l'un des mouvements les plus rapides du monde vivant. Après une difficile quête pour accéder à un système d'imagerie rapide, j'ai enfin pu filmer au ralenti les coups de la squille. Les images étaient si extraordinaires que j'ai immédiatement su que nous étions tombés un peu par hasard sur un phénomène tout à fait hors norme. Les mouvements s'étendaient sur quelques images seulement, alors que

nous filmions à 5 000 images par seconde, ce qui témoignait de vitesses et d'accélérations extrêmes. Et j'ai vite compris que dans le monde vivant, les mouvements les plus rapides ne sont pas la course des guépards, le clignement des yeux ou la fuite des poissons. On les trouve chez de petites créatures méconnues qui ont maîtrisé l'un des grands défis de la physique et de l'ingénierie : la production d'une puissance extrême.

Au fil des années suivantes que j'ai consacrées aux systèmes biologiques ultrarapides, ce domaine de recherche émergent a livré de nombreuses et surprenantes informations à l'interface de la biologie, de la physique et de l'ingénierie. Le monde du vivant ultrarapide est peuplé d'organismes extraordinaires tels que des fourmis à mandibules-pièges (du genre *Odontomachus*), des champignons à spores autopropulsées, des termites à mandibules balistiques *(Termes panamensis)*, des méduses urticantes...

■ L'AUTEURE



Sheila N. PATEK est maître de conférences au département de biologie de l'université Duke, aux États-Unis. Ses recherches sont à l'interface de la physique et de la théorie de l'évolution (systèmes ultrarapides et acoustique des invertébrés).

Article publié avec l'aimable autorisation de la revue *American Scientist*.

L'organisme ultrarapide le plus étudié

La crevette-mante est dans ce domaine l'organisme qui a été le plus étudié. Elle constitue aujourd'hui un modèle clé pour explorer l'histoire évolutive de l'armement extrême, les compromis mécaniques et évolutifs accompagnant les mouvements extrêmes, et les applications techniques de ces découvertes biologiques.

L'analyse des premières images à grande vitesse de la crevette-mante en train d'écraser le malheureux escargot a montré que les mouvements étaient beaucoup plus rapides que tout ce que nous avions pu imaginer. Les pièces buccales en forme de marteau de ces crustacés, nommées appendices ravisseurs, subissent une accélération semblable à celle d'une balle de fusil (100 000 mètres par seconde carrée) et atteignent des vitesses de 31 mètres par seconde, soit plus de 110 kilomètres par heure.

Le coup est si bref qu'il pourrait y en avoir plus d'une centaine dans l'intervalle de temps que dure un clin d'œil. Un humain aurait besoin d'un solide marteau pour casser les mêmes escargots, alors que ces crustacés longs de quelques centimètres les brisent avec des appendices ravisseurs plus petits que le doigt d'un bébé.

LORSQU'UNE SQUILLE FRAPPE un escargot marin à l'aide d'un de ses appendices en forme de marteau, le mouvement est si rapide qu'il est invisible à l'œil nu. Le coup ne dure que quelques millièmes de seconde.



Une question de puissance, pas d'énergie

Dès qu'il est question de mouvement animal, le rôle des muscles vient à l'esprit. Or ces organes ne suffisent pas pour expliquer les coups de la crevette-mante. Une analogie simple permet de comprendre pourquoi.

Imaginez que vous jetiez une flèche sur une cible en n'utilisant que les muscles de vos bras. La flèche n'irait ni très loin ni très vite. Mais si vous vous servez des mêmes muscles pour bander un arc, puis que vos doigts libèrent la flèche, celle-ci atteint facilement la cible et la transperce. Or l'énergie investie est la même, que l'on utilise un arc ou non. L'unique différence est la durée sur laquelle l'énergie est libérée. Avec les seuls muscles du bras, l'énergie est libérée en un temps relativement long. Avec l'arc, l'énergie se libère sur une durée extrêmement courte. Il en résulte une amplification de la puissance, clé de tous les mouvements ultrarapides.

La puissance est définie comme le rapport énergie/temps. Si, à énergie constante, la durée diminue, alors la puissance augmente. Comme dans l'exemple de l'arc et de la flèche, les appendices ravisseurs de la squille multicolore contiennent un « ressort » et une « gâchette » grâce auxquels la puissance est fortement amplifiée. Le mécanisme en jeu n'est qu'une amélioration des contractions classiques de muscles antagonistes caractérisant les systèmes moteurs de la plupart des animaux. À l'instar de nos bras ou jambes actionnés par des paires de muscles extenseurs et

fléchisseurs, les appendices ravisseurs de la squille sont déployés par les muscles extenseurs lorsque l'animal frappe, et sont repliés contre le corps par les muscles fléchisseurs pendant qu'il vaque à ses autres activités.

Emmagasiner de l'énergie élastique

Cependant, lorsque la squille doit décocher un coup puissant, elle contracte simultanément les muscles extenseurs et fléchisseurs (comme les contractions des muscles antagonistes des jambes que nous effectuons avant de sauter). Le gros muscle extenseur comprime un système élastique, constitué par une partie en forme de selle de la carapace de l'appendice ravisseur. Quant au minuscule muscle fléchisseur, il tire, en se contractant, une saillie minéralisée de son tendon et coince cette espèce de loquet par-dessus une petite protubérance de l'appendice *(voir la figure page suivante)*.

Ainsi, ces deux contractions mettent le système sous tension élastique et le bloquent. Pour frapper, la crevette-mante relâche le muscle fléchisseur et débloque sa gâchette. L'énergie élastique emmagasinée se libère alors brusquement et pousse violemment le marteau vers l'avant.

À des degrés divers, c'est l'astuce de tous les systèmes de forte puissance : ils séparent, spatialement et temporellement, l'amorçage lent et le stockage de l'énergie de la libération rapide d'énergie, qui amplifie la puissance.

Ainsi, les fourmis à mâchoires-pièges relâchent de minuscules verrous qui bloquent leurs mandibules préarmées, ce qui leur permet de tuer une proie ou de sauter.

Dans les champignons qui propulsent leurs spores, deux gouttelettes grossissent progressivement jusqu'à ce qu'elles fusionnent brusquement, ce qui fournit la puissance nécessaire au lancement d'une spore.

Chez les méduses, les cellules urticantes – les cnidocytes – se pressurisent lentement, puis, quand leur cil sensitif est stimulé par le contact d'une proie, elles s'ouvrent d'un coup et expulsent leur nématocyste, un organite urticant composé notamment d'un filament épineux et venimeux *(voir la figure ci-contre)*.

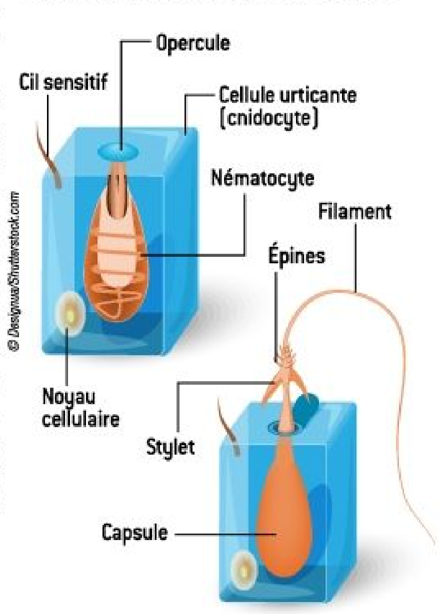
Les premières images à grande vitesse des coups portés par la squille multicolore ont montré une autre caractéristique remarquable : la formation d'une grosse bulle entre le marteau de la squille et sa proie, puis son implosion. C'est la source première des bruits secs entendus au laboratoire. Il s'agit du phénomène dit de cavitation, qui se produit lors de mouvements très rapides dans un fluide.

De tels mouvements créent en effet des zones de basse pression, où se forment des bulles de vapeur. Ces bulles s'effondrent en un temps si court que l'énergie brutalement libérée peut conduire localement à de hautes températures et à l'émission de lumière ou de son. C'est un défi pour les ingénieurs : par exemple, les hélices des bateaux qui tournent très vite s'usent sous l'effet de l'implosion des bulles de cavitation, et les sous-marins en mouvement rapide font beaucoup de bruit, également en raison de l'implosion des bulles, ce qui est bien sûr gênant pour des vaisseaux censés être discrets.

Coup double avec les bulles de cavitation

Les armes fondées sur la cavitation étaient déjà connues des biologistes qui avaient observé la production de bulles par les crevettes-pistolets (de lointaines cousines des crevettes-mantes). Toutefois, les forces de cavitation restaient à mesurer dans ces contextes biologiques. J'ai développé une approche qui utilise des capteurs piézoélectriques opérant à des cadences très élevées. Grâce à elle, nous avons mesuré à la fois les forces produites par l'impact de l'appendice


© Kurt-G/Shutterstock.com



LA FERMETURE DES MANDIBULES de fourmis à mâchoires-pièges *(photographie)* et le déclenchement des cellules urticantes des méduses *(schémas)* sont d'autres exemples de mouvements biologiques ultrarapides.

et celles engendrées par l'implosion de la bulle de cavitation. Nous avons ainsi mis en évidence que chaque coup de marteau de la squille est double : il y a d'une part l'impact mécanique, d'autre part l'impact des ondes de pression dues à l'implosion de la bulle de cavitation. Les forces atteignent 400 à 1 500 newtons pour l'impact mécanique, et les forces de cavitation 500 newtons.

Un appendice qui tient le choc

Les puissants assauts de la squille contre les coquillages marins sont associés à un risque non négligeable pour le crustacé d'endommager son propre appendice. De fait, les coquilles d'escargots marins sont considérées comme l'un des matériaux biologiques les plus solides, et pourtant la squille parvient à les briser sans abîmer ses propres appendices.

Intrigués par cette capacité peu commune, David Kisailus, de l'université de Californie à Riverside, et ses collègues ont révélé la composition matérielle et l'arrangement structurel du marteau qui rend possible cette remarquable performance. Ces chercheurs ont découvert que la couche externe du marteau est très dure et fortement minéralisée, principalement composée de phosphore concentré (par exemple du phosphate de calcium) et du matériau habituel des crustacés, le carbonate de calcium. Au sein du marteau, les matériaux sont disposés en couches successives, dont l'orientation tourne, architecture qui a pour effet de dissiper l'énergie et de concentrer les microfissures à l'intérieur de la structure plutôt qu'à sa surface.

Ces découvertes des principes structuraux de l'atténuation des fractures d'impact dans les appendices de la squille ont déjà inspiré de nouveaux matériaux résistants aux impacts. Toujours dans l'équipe de David Kisailus, des chercheurs ont utilisé de petits morceaux de matériaux à base de fibres de carbone et époxy et les ont façonnés en un arrangement hélicoïdal semblable à l'architecture du marteau de la squille. Ils ont alors testé la résistance à l'impact et à la fatigue du nouveau matériau, comparé au marteau de la squille à des échelles de taille similaires. À terme, on pourrait utiliser les matériaux inspirés par les squilles dans des systèmes de protection alliant légèreté et résistance à des impacts d'objets rapides.

Le coup de marteau a un coût

En toute logique, tous les organismes auraient intérêt à avoir des capacités cinématiques extrêmes. Pourtant, les scientifiques ne connaissent qu'une poignée d'organismes ultrarapides. Une première explication à cela est tout bonnement que nous ne les avons pas encore tous découverts, entre autres parce que les mouvements ultrarapides sont invisibles à l'œil nu. Avant de filmer les squilles à l'aide de caméras à haute vitesse, nous n'avions aucune idée de leur rapidité réelle.

Les découvertes réalisées sur la squille nous ont poussés à rechercher d'autres organismes ultrarapides, ce qui a conduit aux études sur les fourmis à mâchoires-pièges, ainsi que sur le lancement quasi invisible de spores par certains champignons. Mais il est également probable qu'un ensemble de compromis guident et limitent la diversification

DE L'ÉNERGIE LIBÉRÉE BRUTALEMENT

Les mouvements ultrarapides tels que celui de l'appendice des squilles frappeuses reposent sur un mécanisme de type ressort, un peu comme un arc et une flèche. Un système élastique *(en bleu foncé)* – la selle chez la squille – emmagasine de l'énergie potentielle. Cette dernière est libérée en un temps très court par un mécanisme de type gâchette ou verrou *(en vert)* – dans le cas de la squille, une encoche située sur le tendon du muscle fléchisseur est débloquée.

biologique, et que les systèmes ultrarapides soient en contrepartie soumis à des limitations importantes.

Une première indication des limitations imposées aux systèmes ultrarapides est apparue quand nous avons décidé de filmer un autre type de squilles que les espèces à marteau de nos études initiales. L'arbre phylogénétique des squilles révèle en effet que les espèces frappeuses, munies d'un marteau, sont peu nombreuses. La grande majorité des espèces de squilles sont des ravisseuses : leur appendice ravisseur est allongé, en forme de lance ou de harpon mais dépourvu de marteau, et sert à transpercer de petites proies. D'après les analyses moléculaires et fossiles, les squilles frappeuses sont apparues à partir des squilles ravisseuses il y a environ 50 millions d'années.

Après avoir mesuré les étonnantes vitesses des squilles frappeuses, Maya deVries, aujourd'hui à l'institut d'océanographie Scripps en Californie, et moi pensions que nous allions découvrir une cinématique encore plus impressionnante chez les ravisseuses. Il n'en est rien : les ravisseuses ont des mouvements n'atteignant qu'une fraction des vitesses et accélérations des frappeuses.

La découverte que les crevettes-mantes ravisseuses, qui se nourrissent de petits poissons, ont des mouvements bien plus lents que les frappeuses allait à l'encontre de l'intuition ; nous nous attendions en effet à ce que les animaux dotés des armes les plus rapides soient ceux qui chassent les proies les plus rapides. En réalité, en examinant les habitudes des animaux ultrarapides, nous avons constaté que la plupart ne ciblent pas des proies rapides. Ils visent plutôt des proies bien protégées à coquille dure, qui ne s'échappent généralement pas quand elles sont attaquées. S'ils disposent d'une machinerie biologique capable d'attraper des proies qui sautent ou qui nagent, pourquoi les animaux ultrarapides ne chassent-ils pas des proies qui fuient ?

Un inconvénient majeur des systèmes ultrarapides est la perte de contrôle de l'arme une fois que le coup est parti. Par exemple, lorsqu'on se sert d'un arc et de flèches pour chasser, la flèche est préarmée et pointée, mais une fois qu'elle est décochée, l'archer ne peut plus ajuster sa trajectoire et le projectile n'atteindra sa cible que si la proie est restée immobile. Les animaux ultrarapides vont si vite que leurs neurones ne peuvent ni suivre ni modifier le mouvement une fois qu'il est déclenché.

Inconvénient majeur des systèmes ultrarapides : la perte de contrôle de l'arme une fois le coup parti

Dans une analyse de l'activité musculaire précédant le mouvement ultrarapide, l'un de mes postdoctorants, Katsushi Kagaya (aujourd'hui au laboratoire Seto de biologie marine, au Japon), a montré que la squille fait varier sa vitesse de frappe en modifiant



LES SQUILLES RAVISSEUSES, ici *Lysiosquillina sulcata*, sont des prédateurs qui harponnent des poissons au déplacement rapide. Bien que leurs proies soient plus rapides que les escargots, leurs appendices bougent à une vitesse et avec une accélération très inférieures à celles des crevettes-mantes briseuses d'escargots. Cela traduit le nécessaire compromis entre la rapidité de la préparation du coup et sa puissance.

APERÇU DE L'ULTRARAPIDITÉ DANS LE MONDE VIVANT

Les organismes ultrarapides, telles les squilles et les fourmis à mâchoires-pièges, exécutent des mouvements bien plus rapides qu'un clignement d'œil ou que la course d'un guépard. Les cellules urticantes des méduses, ou cnidocytes, occupent la première place au palmarès de la brièveté et de l'accélération.

DURÉE	VITESSE	ACCÉLÉRATION (ordre de grandeur)
0,7 microseconde (µs) • Cnidocytes (cellules urticantes des méduses)	**67 mètres par seconde (m/s)** • Mandibules des fourmis à mâchoires-pièges • Mâchoires de termite	**10^7 mètres par seconde carrée (m/s²)** • Cnidocytes
10 µs • Spores fongiques	**58 m/s** • Plongeon du faucon gerfaut	**10^6 m/s²** • Mandibules des fourmis à mâchoires-pièges
25 µs • Mâchoires de termite	**37 m/s** • Cnidocytes	**10^5 m/s²** • Squille frappeuse • Spores fongiques
100-300 µs • Mandibules des fourmis à mâchoires-pièges • Fermeture du piège des utriculaires (plantes carnivores souvent aquatiques)	**31 m/s** • Squille frappeuse	**10^3 m/s²** • Squille ravisseuse • Aspiration exercée par le piège de l'utriculaire
1 à 6 millisecondes • Frappe d'une squille	**25-26 m/s** • Course de guépard • Jet d'eau de crevette-pistolet	**10^2 m/s²** • Poisson en fuite • Coup de calmar • Saut de criquet
10 millisecondes • Saut de criquet	**Environ 10 m/s** • Coureur (humain) le plus rapide • Expulsion des spores de fougères	**10 m/s²** • Course de guépard • Saut de grenouille
0,1 seconde • Saut de grenouille	**2-3 m/s** • Spores fongiques • Saut de grenouille • Saut de criquet	
0,3 seconde • Clignement d'œil		

l'activité musculaire pendant l'armement du ressort, mais une fois le coup amorcé, le mouvement est trop rapide pour que le système nerveux puisse l'ajuster.

Un autre compromis spécifique à la biologie pour les systèmes ultrarapides relève presque de la contradiction : il faut beaucoup de temps pour être ultrarapide. Si l'on revient au principe d'amplification extrême, ses caractéristiques essentielles sont l'énergie potentielle stockée (typiquement dans des ressorts) et la libération rapide de l'énergie (au moyen d'une gâchette). Cela signifie que l'énergie est stockée à l'avance et relâchée très rapidement. Pour les systèmes ultrarapides faisant appel à des muscles, ce compromis est flagrant : les muscles ne peuvent pas se contracter à la fois fortement et vite. Expliquons pourquoi.

L'élément de base des muscles striés, le sarcomère, contient des filaments de myosine et d'actine (des protéines) qui, en se liant, engendrent la contraction. Avec des sarcomères plus longs, davantage de liaisons myosine-actine peuvent se former à un instant donné, et la force globale du muscle augmente. Cependant, le taux de formation de liaisons diminue. En effet, pour que chacune se fasse et que les myosines se déforment afin de réaliser la contraction, il faut de l'énergie, fournie par d'autres molécules. Par conséquent, plus les liaisons sont nombreuses, plus il faut renouveler ces molécules, ce qui prend du temps et se traduit par une contraction musculaire plus lente. En résumé, les sarcomères plus longs donnent lieu à une force musculaire plus importante, mais au prix d'une contraction plus lente.

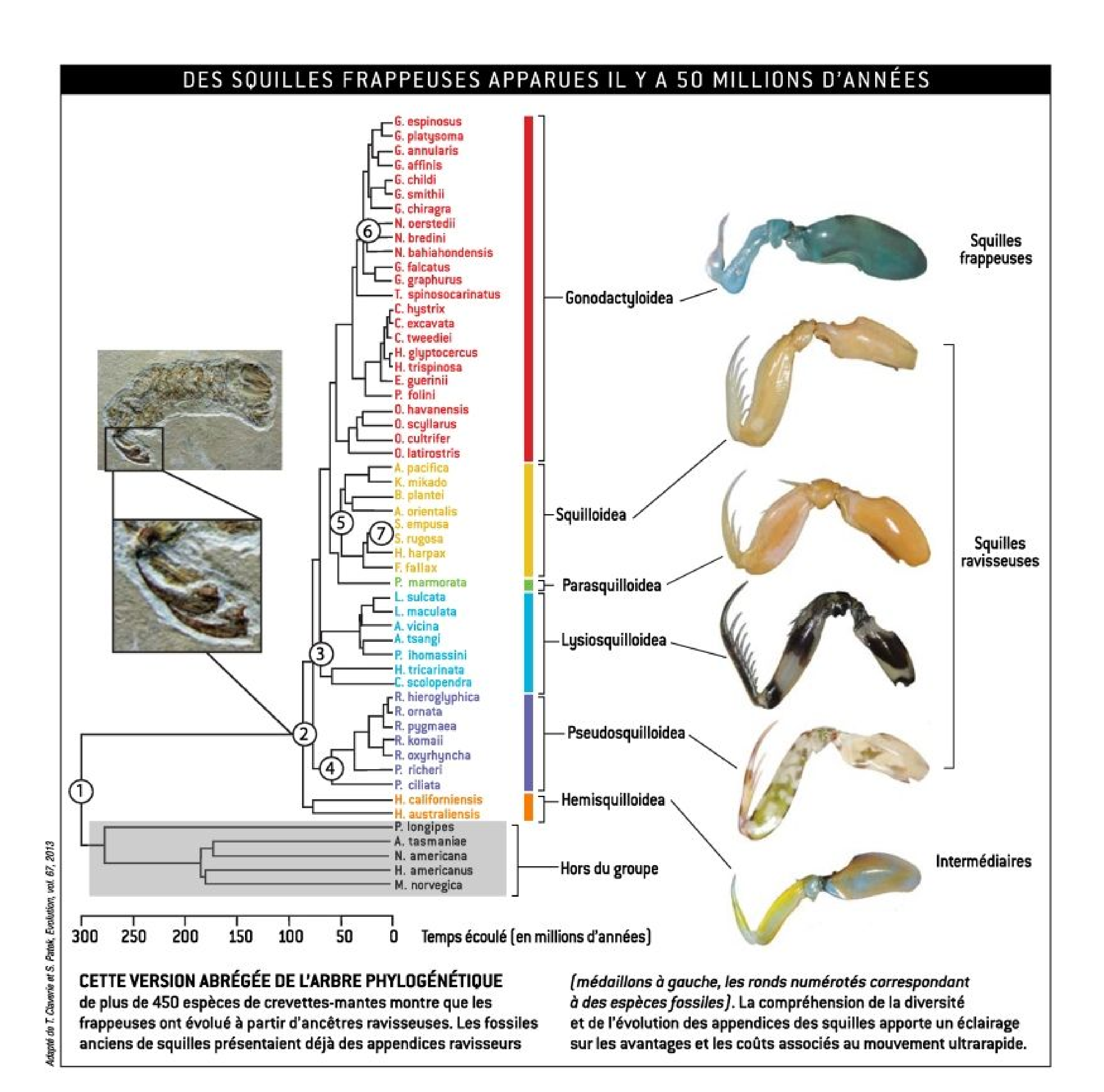
Un compromis entre vitesse de réaction et vitesse de mouvement

Mettant à profit la diversité des appendices ravisseurs dans l'arbre de l'évolution des squilles, Marco Mendoza Blanco (un ancien étudiant) et moi avons montré comment le compromis universel entre force et vitesse de contraction d'un muscle se manifeste dans les systèmes ultrarapides.

Nous avons constaté que, ravisseuses ou frappeuses, les squilles avaient toutes des sarcomères longs (une dizaine de micromètres, contre environ 3 micromètres dans le muscle du poignet humain) dans le muscle qui arme les ressorts. Cependant, les squilles ravisseuses, qui chassent des proies fuyantes, ont des sarcomères jusqu'à 50 % plus courts que ceux des frappeuses. Bien que les données comportementales restent à recueillir, il semble que les frappeuses aient développé au fil de l'évolution des sarcomères plus longs, qui leur permettent de comprimer des ressorts plus puissants et donc d'asséner un coup puissant, mais au prix d'un armement plus lent du système.

Ainsi, les animaux les plus rapides ne seraient pas en mesure de charger leurs armes suffisamment vite pour capturer des proies en fuite. Paradoxalement, les prédateurs de proies fuyantes peuvent réagir plus rapidement, mais avec des mouvements plus lents. Dit simplement, cela prend plus longtemps d'être plus rapide, et tout système musculaire

DES SQUILLES FRAPPEUSES APPARUES IL Y A 50 MILLIONS D'ANNÉES



CETTE VERSION ABRÉGÉE DE L'ARBRE PHYLOGÉNÉTIQUE de plus de 450 espèces de crevettes-mantes montre que les frappeuses ont évolué à partir d'ancêtres ravisseuses. Les fossiles anciens de squilles présentaient déjà des appendices ravisseurs *(médaillons à gauche, les ronds numérotés correspondant à des espèces fossiles)*. La compréhension de la diversité et de l'évolution des appendices des squilles apporte un éclairage sur les avantages et les coûts associés au mouvement ultrarapide.

ultrarapide sera confronté à ce nécessaire compromis au cours de la diversification évolutive, ce qui explique que les systèmes biologiques ultrarapides ne soient pas plus répandus.

Nos analyses de l'évolution de la morphologie des diverses espèces de squilles confirment que l'acquisition d'une cinématique extrême a un coût. Avec Thomas Claverie, aujourd'hui au Centre universitaire de formation et de recherche de Mayotte, nous avons établi que la morphologie des appendices des squilles frappeuses a changé plus lentement au fil de l'évolution que chez les autres crevettes-mantes.

En comparaison avec les squilles ravisseuses, on observe, associés à cette vitesse réduite, des changements plus étroitement coordonnés parmi les composants mécaniques des squilles frappeuses. Il est fort possible que les contraintes physiques du mécanisme ultrarapide chez les crevettes frappeuses aient réduit la variabilité inhérente de ces composants, limitant ainsi le potentiel de changements évolutifs. Un potentiel réduit de diversification évolutive représente un coût élevé, et constitue certainement un contrepoint à l'idée quelque peu naïve selon laquelle les systèmes ultrarapides seraient le *nec plus ultra* du design.





© Avec l'aimable autorisation de Roy Caldwell

LES COUPS PORTÉS PAR LES SQUILLES sont si puissants qu'il est dangereux pour elles de se battre. Les mâles et les femelles qui se disputent de la nourriture ou un territoire se frappent mutuellement leur queue cuirassée (leur telson) pour se mesurer. Ces démonstrations de force ritualisées permettent à ces crustacés d'éviter de porter des coups fatals.

Le dernier compromis est peut-être le plus radical : les armes ultrarapides étant souvent mortelles, les populations et les espèces qui survivent à long terme sont celles dont les organismes ont développé des stratégies pour éviter ou réduire leur utilisation contre leurs congénères.

Là encore, notre modèle, la squille, apporte quelques leçons. Les squilles sont pour l'essentiel des organismes au corps mou, à l'exception de leurs appendices ravisseurs et de leur telson (leur queue aplatie et cuirassée), si bien qu'un coup bien dirigé a toutes les chances d'être létal.

Cependant, les squilles frappeuses règlent leurs conflits par un comportement ritualisé, où l'une frappe le telson de l'autre. Jennifer Taylor, actuellement à l'institut Scripps d'océanographie, a constaté que le marteau frappeur et le telson qui reçoit ses coups interagissent selon une dynamique semblable à celle d'une batte en frêne qui frappe une balle de baseball, et que l'énergie renvoyée au marteau dépend de la taille de l'animal visé. Il est donc possible que les squilles évaluent leurs tailles respectives grâce à ces duels ritualisés.

Depuis que nous avons obtenu les premières images des coups portés par la squille et commencé à mettre au jour les originalités des organismes ultrarapides, ce nouveau champ de la biologie est devenu un domaine pluridisciplinaire et particulièrement pertinent pour les systèmes humains et la conception technique.

Tandis que les recherches se poursuivent en espérant de nouvelles découvertes d'organismes ultrarapides, l'histoire évolutive de ces derniers éclaire des principes de conception technologique. En évoluant sur des millions d'années et en laissant derrière elles des vestiges fossiles qui documentent directement la diversification des appendices au fil du temps, les squilles offrent une expérience naturelle en conception de systèmes dans un large éventail de conditions historiques et actuelles, dans des habitats aussi divers que la boue, le sable et les coraux vivants, depuis les zones de balancement des marées jusqu'aux profondeurs océaniques.

Biologie ultrarapide : une grande diversité

Les fourmis à mâchoires-pièges présentent elles aussi une extraordinaire diversité évolutive ; dans leur cas, au moins quatre origines évolutives indépendantes ont conduit à des mandibules ultrarapides, offrant donc tout un jeu de données qui rassemblent en parallèle les conditions d'apparition des mécanismes ultrarapides. De même, il existe de nombreuses espèces de champignons qui propulsent leurs spores, avec une diversité de formes susceptibles d'inspirer des systèmes artificiels de propulsion par gouttelettes. Et l'on trouve aussi une grande diversité chez les crevettes frappeuses, dans les cellules urticantes de méduses, etc.

De la dynamique comportementale des combats ritualisés à la lutte contre les méfaits du phénomène de cavitation, ces organismes puissants quoique petits ont ouvert de nombreuses fenêtres inattendues sur la physique, l'évolution, l'ingénierie et l'écologie. ■

BIBLIOGRAPHIE

P. S. L. Anderson *et al.*, **Competing influences on morphological modularity in biomechanical systems : A case study in mantis shrimp**, *Evolution & Development*, vol. 18(3), pp. 171-181, 2016.

K. Kagaya et S. N. Patek, **Feed-forward motor control of ultrafast, ballistic movements**, *Journal of Experimental Biology*, vol. 219(3), pp. 319-333, 2016.

S. Cox *et al.*, **A physical model of the extreme mantis shrimp strike : Kinematics and cavitation of Ninjabot**, *Bioinspiration & Biomimetics*, vol. 9, pp. 1-16, 2014.

T. Claverie et S. N. Patek, **Modularity and rates of evolutionary change in a power-amplified prey capture system**, *Evolution*, vol. 67(11), pp. 3191-3207, 2013.

J.-M. Courty et É. Kierlik, **Clac végétal et uppercut de crevette**, *Pour la Science*, n° 346, août 2006.

Le bébé
un linguiste en herbe



Patricia Kuhl

Tout enfant est capable de maîtriser l'une des 7 000 langues connues. Son apprentissage dépend de façon cruciale des interactions sociales et de la répétition des sons entendus.

Les tout-petits ont un don étonnant : très vite, ils sont capables de maîtriser une langue. À 6 mois, un enfant apprend les sons caractéristiques de la langue française. Et s'il entend parler le tagalog ou le quechua, il retiendra les traits acoustiques si particuliers de ces deux idiomes. Un bambin prononce ses premiers mots à 1 an, et dès l'âge de 3 ans il converse avec ses parents, un camarade de jeu ou un inconnu.

Depuis quarante ans, j'étudie le développement infantile et la façon dont, en quelques années, les enfants passent du babillage à un langage articulé autour de mots et de phrases. Et je suis toujours aussi émerveillée par la rapidité avec laquelle les enfants acquièrent cette compétence. Depuis quelques années, les chercheurs commencent à comprendre ce qui se passe dans le cerveau de l'enfant au cours du processus d'apprentissage.

À la naissance, le cerveau du bébé perçoit l'intégralité des quelque 800 sons – les phonèmes – qui, associés les uns aux autres, forment les mots de toutes les langues parlées sur Terre. Nos recherches montrent que le cerveau de l'enfant passe, entre 6 et 12 mois, par une période « sensible » au cours de laquelle il se prépare à acquérir les rudiments du langage.

Vers l'âge de 6 mois, le cerveau de l'enfant s'attelle à la reconnaissance spécifique des voyelles de sa langue natale, puis vers 9 mois à celle des consonnes. La « période sensible » ne dure que quelques mois, parfois plus si l'enfant est au contact d'une seconde langue. Jusqu'à 7 ans, un enfant peut apprendre à parler une autre langue presque couramment.

L'aptitude intrinsèque à l'apprentissage du langage ne suffit pas à dépasser le stade des premiers « mama » et « papa » que prononce le bébé. La maîtrise de cette compétence sociale essentielle est favorisée par les innombrables heures que l'enfant passe à écouter ses parents lui parler avec ce langage si typique : les inflexions exagérées – « Mais qu'il est mimi ce petit bébé » – servent un objectif qui n'a rien de futile. Elles fournissent au bébé des leçons quotidiennes d'intonation et de cadence dans sa langue maternelle.

Nos connaissances relatives au développement du langage dans sa première phase ont, aujourd'hui, atteint un niveau assez avancé pour que les psychologues et les médecins puissent mettre au point

L'ESSENTIEL

- **À six mois, un bébé est capable de percevoir les sons d'une ou deux langues. Il se prépare ainsi à développer les tons et les cadences de sa langue maternelle.**
- **Le bébé acquiert cette compétence grâce à ses échanges avec ses parents et en prêtant une attention particulière aux sons du langage les plus fréquents.**
- **L'imagerie cérébrale commence à montrer comment les tout-petits apprennent le langage. Ces techniques pourraient à terme indiquer si le cerveau de l'enfant se développe correctement.**



L'ACQUISITION DU LANGAGE est un processus complexe. Pourtant, en moins d'un an, les bébés produisent leurs premiers mots.

des outils d'aide aux enfants ayant des difficultés d'apprentissage. Par ailleurs, l'imagerie cérébrale ouvre des perspectives sur la possibilité de déterminer si l'enfant développe normalement ses capacités linguistiques ou s'il présente des troubles.

Ce dépistage nécessite des tests que nous commençons à esquisser à partir de nos découvertes les plus récentes sur le développement du langage. Mon équipe et d'autres ont montré que les enfants utilisent deux mécanismes d'apprentissage distincts aux premiers stades de l'acquisition du langage : l'un reconnaît les sons par un processus mental qui évalue leurs occurrences dans les paroles des parents, l'autre procède d'une intense immersion sociale.

Pour apprendre à parler, les enfants doivent identifier les phonèmes dont sont formés les mots qu'ils entendent. Sur environ 800 phonèmes, ils doivent discriminer la quarantaine de ces éléments utiles pour parler leur propre langue. Cette tâche consiste à distinguer les sons prononcés, une opération difficile car une seule consonne modifie le sens d'un mot, comme avec « car » et « gare ». Et une voyelle telle que « o » se prononce ouverte ou fermée en fonction des consonnes qui l'entourent : une « pomme », un « numéro ».

Mes travaux et ceux de l'équipe de Jessica Maye, alors à l'université Northwestern à Chicago, ont montré que les modèles statistiques – les fréquences des différents sons – jouent un rôle primordial dans la façon dont l'enfant prend conscience de l'importance de tel ou tel phonème. Les enfants âgés de 8 à 10 mois ne comprennent pas encore les mots prononcés, mais ils sont extrêmement sensibles à la fréquence d'occurrence des phonèmes. Les phonèmes les plus importants d'une langue sont ceux que l'on prononce le plus souvent. Par exemple, en français (ou en anglais) les sons /r/ et /l/ sont assez fréquents. En japonais, le /r/ et le /l/ à la française sont rares, mais le /r/ japonais, un son intermédiaire (le mot japonais « ramen » résonne comme « laamen » à une oreille française), est commun.

■ **L'AUTEUR**



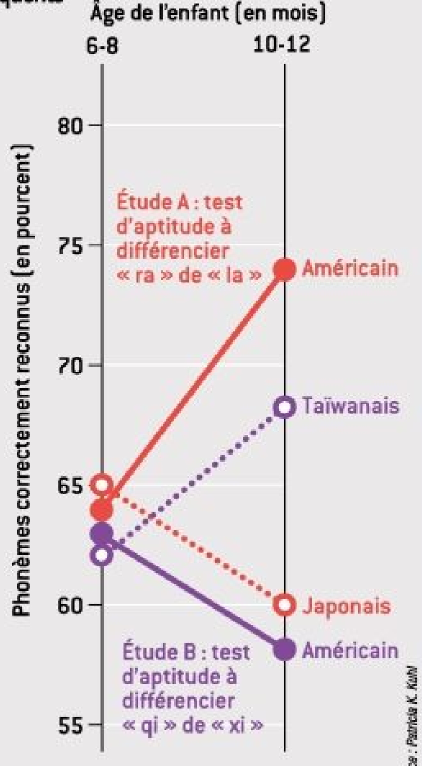
Patricia KUHL codirige l'Institut des sciences du cerveau et de l'apprentissage de l'université de Washington, aux États-Unis, et dirige le LIFE Center, un centre pour la science et l'apprentissage.

La période sensible

L'ensemble des langues utilisent environ 800 phonèmes ou sons, qu'un bébé est capable de percevoir indépendamment de la culture dans laquelle il est élevé. Mais en fonction de son environnement et des langues qu'il entend, il se focalise sur les phonèmes les plus fréquents et perd la faculté à distinguer les autres.

Entre 6 et 8 mois, les tout-petits ont la capacité de discriminer les unités phonétiques, telles que « ra » ou « la ». Mais vers 10 mois, cette fenêtre commence à se fermer, et certains signes montrent que les enfants sont de plus en plus reliés par le son à leur propre culture. Au cours d'une étude menée à Tokyo et à Seattle, il a été constaté que l'aptitude d'enfants japonais à entendre la différence entre « ra » et « la » diminuait, alors que celle des enfants américains à percevoir la distinction entre ces deux sons augmentait sur cette même période *(en rouge)*.

Une étude menée à Taipei et à Seattle a montré que l'aptitude des enfants taïwanais à entendre la différence entre « qi » et « xi » croissait. En revanche, sur les mêmes sons, celle des enfants américains perdait du terrain *(en violet)*. Les tout-petits, instinctivement, font exactement ce qu'il faut pour progresser rapidement dans l'apprentissage de leur langue.



Statisticien en herbe

La fréquence statistique des sons influe sur le cerveau des tout-petits. Dans une étude réalisée sur des enfants de 6 mois à Seattle, aux États-Unis, et à Stockholm, en Suède, nous avons démontré que chaque groupe se concentrait déjà sur les voyelles de sa langue natale. L'environnement linguistique commence très tôt à s'insinuer dans le cerveau du bébé et à influencer la manière dont il perçoit les sons.

Que se passe-t-il exactement ? Jessica Maye a montré que le cerveau, à cet âge, a la plasticité requise pour modifier la perception des sons. Un bébé japonais qui entend les sons de la langue française distingue les sons /r/ et /l/ à la manière d'un petit Français. Et bien sûr, l'inverse est tout aussi vrai. Il semble qu'apprendre des sons entre 6 et 12 mois permet d'établir dans le cerveau des connexions associées à sa langue maternelle et à celles auxquelles l'enfant est exposé au cours cette période.

Plus tard, au cours de l'enfance et surtout à l'âge adulte, le fait d'être au contact d'une nouvelle langue ne produit pas d'effets aussi spectaculaires. Une personne qui voyage à l'étranger peut entendre les sons caractéristiques de la langue locale, mais cette expérience n'influe pas sur son

LE CERVEAU DU BÉBÉ, PLUS DÉVELOPPÉ QU'ON NE LE PENSAIT

Ces dernières années ont vu l'explosion des techniques d'imagerie cérébrale qui suivent, sans inconfort pour le volontaire, l'activité du cerveau durant une tâche cognitive. Même de très jeunes bébés peuvent participer.

Deux types de méthodes sont disponibles : d'une part, celles à haute sensibilité temporelle, telles l'électroencéphalographie (EEG) et la magnétoencéphalographie (MEG), fondées sur l'enregistrement direct de l'activité électrique des neurones ; d'autre part, celles à haute sensibilité spatiale, telles que l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) et la spectroscopie dans le proche infrarouge (NIRS).

Ces deux dernières reposent sur la concentration en oxy- et déoxyhémoglobine dans les vaisseaux irriguant la région cérébrale activée. L'hémoglobine, la molécule transportant l'oxygène dans les globules rouges, a en effet des propriétés magnétiques (IRM) et d'absorption de la lumière (NIRS) qui varient en fonction de son état – oxygéné ou non. Ces variations sont cependant trop lentes pour suivre une succession d'opérations cognitives, qui sera mieux décrite avec l'EEG et la MEG. Aussi les techniques sont-elles en général combinées pour étudier où, quand et comment nos cellules « grises » perçoivent, raisonnent et agissent.

Il y a une vingtaine d'années, ces techniques ont révolutionné la compréhension du développement cognitif de l'enfant. Jusqu'alors, seules des expériences indirectes utilisant la succion ou le temps de regard permettaient d'étudier les capacités cognitives du jeune enfant. Si certains scientifiques et médecins pensaient que le nourrisson de quelques jours n'était que vide et confusion, l'imagerie a montré qu'il n'en était rien.

Les grands réseaux cérébraux décrits chez l'adulte sont observés chez le nourrisson. On retrouve notamment le même réseau de régions cérébrales qui s'activent à l'écoute de la parole, avec déjà un traitement préférentiel dans l'hémisphère gauche. Ces asymétries fonctionnelles sont une caractéristique très particulière du fonctionnement du cerveau humain, que l'on a longtemps cru être une conséquence de l'apprentissage. En fait, nous les retrouvons déjà chez le prématuré, né à six mois de grossesse, quand les informations du monde extérieur commencent à parvenir à la plaque corticale. À cet âge, les neurones sont toujours en train de migrer de leur site de multiplication, au centre du cerveau, vers leur emplacement définitif, à la périphérie. L'organisation cérébrale est donc en grande partie déterminée à un stade très précoce du développement et l'environnement ne fait qu'affiner une architecture largement déterminée pendant la grossesse.

Un deuxième résultat important dû à l'imagerie cérébrale a été l'implication précoce des régions frontales dans la cognition du bébé. Ces régions importantes pour l'attention, la planification, la conscience de soi et du monde, et des fonctions cognitives de contrôle, ont un développement lent et prolongé jusqu'à l'adolescence. Elles étaient donc jugées trop immatures pour être fonctionnelles dans les premières années de vie. Or ce n'est pas le cas. Elles s'activent quand le bébé reconnaît sa langue maternelle ou la voix de sa mère. Elles sont donc sans doute cruciales pour orienter l'attention du bébé vers un stimulus pertinent de son environnement et dans la découverte des relations particulières telles que la causalité entre deux événements, la simultanéité, l'équivalence, et ainsi faciliter l'apprentissage.

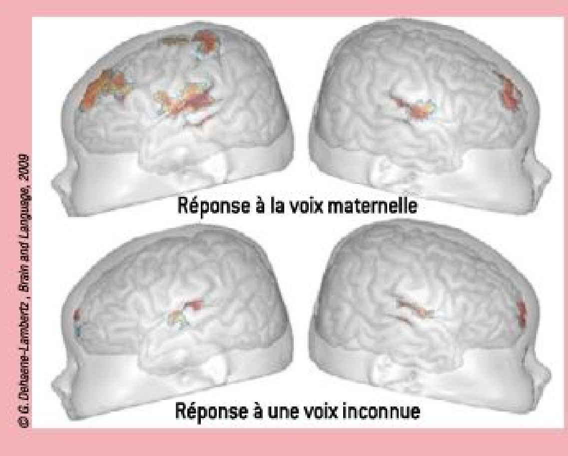
Les résultats d'imagerie cérébrale révèlent donc un nourrisson actif dans son apprentissage, battant en brèche l'idée classique d'une argile que façonne le monde extérieur. L'organisation cérébrale est primordiale, car c'est l'architecture de ces réseaux qui va faciliter la découverte de certaines propriétés de l'environnement, telles les règles de la langue maternelle ou des relations entre individus.

On comprend donc que la mise en place de cette architecture est complexe et que de plus en plus de maladies neurologiques, mais aussi psychiatriques tel l'autisme, ou du développement cognitif, telle la dyslexie, sont liées à un défaut de cette mise en place, dû à un problème génétique, infectieux, toxique ou autre pendant la grossesse. L'imagerie devrait aider à rechercher des marqueurs signalant des difficultés futures, notamment dans des populations à risques (prématurés, fratries de patients autistes, etc.). L'objectif est d'arriver à compenser les difficultés avant qu'elles ne deviennent invalidantes. La fonction du cerveau est d'apprendre et de s'adapter pour être de plus en plus efficace. C'est cette dynamique qu'il faut arriver à soutenir en apportant une stimulation adaptée, quand l'architecture interne ne guide plus l'apprentissage.

– Ghislaine Dehaene-Lambertz
Laboratoire de neuro-imagerie du CEA, CNRS



© F. Wallois inspiré de Mahmoudzadeh et al., 2013



© G. Dehaene-Lambertz, Brain and Language, 2009

Réponses cérébrales
À gauche, des zones du cerveau mesurées en spectroscopie optique (NIRS) chez le prématuré s'activent quand la syllabe entendue change. À droite, le bébé de 2 mois réagit différemment à la voix de la mère ou à une voix inconnue (IRMf). Les asymétries hémisphériques témoignent d'un plan architectural fonctionnel précoce.

cerveau. C'est pourquoi il est si difficile d'apprendre une nouvelle langue lorsqu'on est adulte.

Une deuxième forme d'apprentissage statistique du langage permet aux enfants de reconnaître des mots dans leur globalité. En tant qu'adulte, nous distinguons le début et la fin des mots de notre langue. Mais être capable d'isoler des mots dans un torrent de paroles requiert un processus mental complexe.

Jenny Saffran, aujourd'hui à l'université du Wisconsin à Madison, et ses collègues ont été les premiers à découvrir que les bébés utilisent l'apprentissage statistique pour saisir les sons de mots complets. Au milieu des années 1990, ils ont publié des données montrant qu'un enfant de 8 mois apprend des unités de base similaires à des mots en se fondant sur la probabilité qu'une syllabe en suive une autre. Prenez l'expression « Oh ! mon joli bébé ». La syllabe « jo » est plus susceptible d'être suivie de « li » que d'une autre syllabe comme « la ».

Dans cette étude, les chercheurs faisaient écouter à des bébés des paroles synthétisées par ordinateur et dépourvues de sens. Les mots contenaient des syllabes, certaines apparaissant ensemble plus souvent que d'autres. La réaction des bébés révélait s'ils s'attendaient, ou non, à certains enchaînements de sons.

La découverte de cet apprentissage statistique des bébés a suscité un énorme enthousiasme. Cette nouvelle théorie allait au-delà de l'idée dominante, selon laquelle l'enfant n'apprenait le langage que par le conditionnement parental et les retours qu'il avait sur les mots prononcés (« Non, on ne dit pas comme ceci, mais comme cela »). L'apprentissage commence bien avant.

En 2003, dans mon laboratoire, nous avons montré que l'écoute passive ne suffit pas dans le processus d'apprentissage statistique. Les interactions sociales sont un élément essentiel. Nous avons mené une expérience sur des enfants de 9 mois, vivant à Seattle, et que l'on a exposés au mandarin. Nous voulions ainsi préciser les aptitudes infantiles à capter les phonèmes du mandarin grâce à l'apprentissage statistique.

Les bébés de 8 à 10 mois sont sensibles aux phonèmes de leur langue natale le plus souvent prononcés

Par groupes de deux ou trois, ces petits enfants ont joué avec des natifs de Chine qui leur parlaient en mandarin. Deux autres groupes ont été exposés à cette même langue, l'un par le biais d'une vidéo et l'autre au moyen d'un enregistrement audio. Un quatrième groupe d'enfants, non mis au contact de cette langue, a constitué le groupe témoin. Des étudiants américains leur parlaient anglais, tout en jouant aux mêmes jeux avec eux. L'expérience s'est déroulée en douze séances étalées sur un mois.

Les enfants ont ensuite été soumis, en laboratoire, à des tests afin d'évaluer leur aptitude à distinguer les phonèmes spécifiques au mandarin. Seul le groupe en contact avec des locuteurs natifs a saisi les phonèmes étrangers. En fait, leur performance s'est révélée identique à celle d'enfants de Taipei qui entendaient parler leurs parents depuis la naissance.

Les enfants exposés au mandarin par le biais d'un écran ou d'une bande sonore n'ont rien appris. Leur aptitude à discriminer les phonèmes s'est révélée équivalente à celle des enfants du groupe témoin qui, comme prévu, n'ont pas amélioré leur performance.

Cette étude a montré que, pour le cerveau de l'enfant, l'apprentissage n'est pas un processus passif. Il requiert une interaction humaine, un « cadre social » d'échange. Cette conclusion s'applique aussi à de nombreuses espèces animales. L'expérience que vit un jeune enfant apprenant à parler s'apparente à la manière dont les oiseaux apprennent à chanter.

Avec Allison Doupe, de l'université de Californie à San Francisco, nous avons comparé l'apprentissage chez les bébés et chez certains oiseaux, les diamants mandarins (qui n'ont rien à voir avec le chinois...). Nous avons constaté que l'expérience sociale, dans les premiers mois de l'existence des bébés humains comme des oisillons, est essentielle. Tous s'immergent dans l'écoute de leurs aînés et stockent dans leur mémoire les sons entendus. Ces souvenirs conditionnent les régions motrices du cerveau à produire des sons correspondant à ceux entendus fréquemment dans la communauté au sein de laquelle ils ont été élevés.

La manière dont le contexte social contribue à l'apprentissage d'une langue chez les humains reste à déterminer. Je pense,

Naissance



Les nouveau-nés reconnaissent et préfèrent leur langue maternelle, comparée à celles d'étrangers ou à de la musique.

1-5 mois



Les nourrissons reconnaissent les sons et les syllabes de leur langue dans des énoncés différents.

6 mois



Les nourrissons babillent et peuvent associer les mouvements des lèvres à des sons.

8 mois



Les nourrissons produisent leurs premières voyelles et peuvent détecter les frontières de groupes syntaxiques.

12 mois



Les enfants comprennent et produisent leurs premiers mots.

cependant, que les parents et les autres adultes procurent à la fois la motivation et l'information nécessaires à l'apprentissage linguistique des enfants. La motivation est pilotée par le système de récompense du cerveau et en particulier les zones cérébrales qui utilisent la dopamine, un neurotransmetteur, dans les moments d'interaction sociale. Au laboratoire, nous avons montré que les bébés apprennent mieux en présence d'autres bébés – et nous menons actuellement des études visant à comprendre pourquoi.

L'apprentissage passe par le regard

Les bébés qui plongent leur regard dans celui de leurs parents reçoivent aussi des signaux sociaux essentiels qui accélèrent la phase d'apprentissage ultérieure : la compréhension de la signification des mots. Andrew Meltzoff, de l'université de Washington, a montré que dans les deux premières années de leur vie, les jeunes enfants qui suivent le regard d'un adulte saisissent davantage de vocabulaire que ceux qui ne traquent pas ce mouvement.

Le lien entre le regard et la conversation expliquerait pourquoi le simple fait de regarder une vidéo n'est pas suffisant. Dans le groupe instruit *in vivo*, les enfants voyaient le professeur jeter un coup d'œil vers un objet tout en le nommant, cette action subtile reliant le mot à la chose nommée.

Le rôle de la composante sociale au début de l'apprentissage du langage expliquerait aussi certaines difficultés des enfants qui développent des troubles tels que certaines formes d'autisme. Ceux-ci manquent d'intérêt fondamental pour le langage. En revanche, ils fixent des objets inanimés et ne parviennent pas à prêter attention aux signaux sociaux, si essentiels à l'apprentissage de la langue.



L'IMAGERIE CÉRÉBRALE, ici par magnétoencéphalographie, ouvre des perspectives prometteuses pour comprendre comment le bébé acquiert le langage, mais aussi pour diagnostiquer des difficultés d'apprentissage.

L'aptitude de l'enfant à apprendre à parler ne dépend pas seulement de sa capacité d'écoute vis-à-vis des adultes, mais aussi de la façon dont ces derniers lui parlent. Partout dans le monde, les chercheurs qui écoutent les gens parler aux tout-petits ont constaté qu'un adulte ne parle pas à un enfant comme à un autre adulte. En anglais, les ethnologues et les linguistes nomment ce phénomène *baby talk* (le parler bébé) ou *motherese*, ce qui se traduirait par le « mamanais ». On le retrouve dans la plupart des cultures. Au départ, on se demandait si le parler bébé entravait l'apprentissage de la langue. Or de nombreuses études ont



montré que cette langue interactive aide l'apprentissage de l'enfant. Et le parler bébé n'est pas une invention récente : Varron (116-27 avant notre ère), expert romain de la syntaxe, avait noté que certains mots raccourcis n'étaient utilisés, dans l'Antiquité, que pour s'adresser aux bébés et aux jeunes enfants.

Plusieurs équipes ont analysé les sons spécifiques du parler bébé. Celui-ci intrigue les enfants grâce à la tonalité aiguë, le rythme plus lent et l'intonation exagérée. Lorsqu'on lui donne le choix, l'enfant préfère écouter des enregistrements audio de mères parlant bébé plutôt que ceux des mêmes mères s'adressant à des adultes. La voix haut perchée semble agir comme un hameçon sonore qui capte et retient l'attention de l'enfant.

Le parler bébé accentue les différences entre les sons – un phonème est ainsi plus facile à reconnaître et à mémoriser. Dans le cadre d'une étude récente effectuée par mon groupe, Nairán Ramírez-Esparza, aujourd'hui à l'université du Connecticut, a équipé des petits enfants de magnétophones miniatures de haute-fidélité, fixés sur des vestes légères qu'ils devaient porter chez eux, au cours de la journée. Ces enregistrements nous ont permis de pénétrer le monde auditif des tout-petits. Ils ont montré que lorsque les parents leur parlaient bébé, ces enfants apprenaient en un an deux fois plus de mots que ceux dont les parents utilisaient peu ce type de langage.

Les interactions sociales sont un élément essentiel dans l'apprentissage du langage par les bébés

Détecter les difficultés d'apprentissage

Les spécialistes du cerveau qui étudient le développement infantile espèrent utiliser nos connaissances de plus en plus précises en la matière pour identifier des signatures de l'activité cérébrale – des biomarqueurs – indiquant si l'enfant rencontre des difficultés dans l'apprentissage du langage. Au cours d'une étude récente, nous avons fait écouter à des enfants âgés de 2 ans et atteints de troubles autistiques des mots connus ou inhabituels, et nous avons simultanément enregistré l'activité électrique de leur cerveau.

Nous avons découvert que la fréquence à laquelle apparaissait un motif particulier d'ondes cérébrales en réponse à des mots connus prédisait les aptitudes linguistiques et cognitives futures des enfants, vers l'âge de 4 à 6 ans. Cette étude confirme l'importance des interactions sociales dans l'apprentissage du langage chez les bébés. Si un jeune enfant a la capacité d'apprendre des mots socialement, cela augure bien, en général, de son avenir en matière d'apprentissage.

Nous progressons aussi dans la recherche d'un moyen d'évaluer le développement infantile grâce à de nouveaux outils jaugeant la capacité des bébés à détecter des sons. Mon groupe de recherche commence à utiliser la magnétoencéphalographie (MEG), une technique d'imagerie non invasive et ne présentant aucun danger, pour montrer comment le cerveau réagit au langage. Les capteurs sont placés à l'intérieur d'un dispositif dont la forme évoque un énorme sèche-cheveux *(voir la photo page précédente)*. Quand l'enfant est assis à l'intérieur de la machine, les capteurs mesurent de minuscules champs magnétiques indiquant que des neurones spécifiques déclenchent une réponse dans le cerveau du bébé, pendant qu'il écoute des paroles. Avec la MEG, nous avons déjà montré qu'il existe une période sensible au cours de laquelle les bébés semblent se consacrer à la répétition mentale pour se préparer à parler leur langue maternelle.

La MEG est trop onéreuse et difficile à utiliser dans un établissement médical de taille modeste. Mais ces études ouvrent la voie en identifiant des biomarqueurs qui finiront par être mesurés à l'aide de capteurs portatifs, peu coûteux et utilisables en dehors d'un laboratoire universitaire.

Si des biomarqueurs fiables de l'apprentissage du langage sont mis en évidence, ils serviront à détecter chez l'enfant un éventuel risque de dysfonctionnement précoce lié au langage : troubles du spectre autistique, dyslexie, syndrome de l'X fragile et autres types d'anomalies. Et en progressant ainsi dans la compréhension de cette faculté unique du cerveau humain – et des moments les plus opportuns pour agir dessus –, nous serons peut-être en mesure d'administrer des traitements suffisamment tôt pour améliorer la vie future de certains enfants. ■

■ BIBLIOGRAPHIE

P. Kuhl, **Early language learning and the social brain**, Symposium de biologie quantitative de Cold Spring Harbor, vol. 79, pp. 211-220, 2014.

P. Kuhl *et al.*, **Brain responses to words in 2-year-olds with autism predict developmental outcomes at age 6**, *PLoS One*, vol. 8, n. 5, article n° e64967, 2013.

P. Kuhl, **Brain mechanisms in early language acquisition**, *Neuron*, vol. 67, n° 5, pp. 713-727, 2010.

A. Gopnik, A. Meltzoff et P. Kuhl, **The Scientist in the Crib : Minds, Brains, and How Children Learn**, William Morrow, 1999.



À PARTIR DE 1866 EN FRANCE, les pharmaciens proposaient en toute légalité des mélanges à base de cannabis qu'ils préparaient eux-mêmes à partir d'extraits conservés dans des bocaux ornant les étagères de leurs officines *(ci-contre, une vue d'artiste d'une telle albarelle)*.

Cannabis thérapeutique
le retour en grâce

Thierry Lefebvre et Cécile Raynal

Serions-nous amnésiques ? Le chanvre indien a figuré dans la *Pharmacopée française* de 1866 à 1953. Et il semble avoir été fort prisé par les médecins de l'époque, comme le montre l'histoire de son utilisation thérapeutique, extraite du livre *Médicaments, polémiques et vieilles querelles* (Belin).

Alerte dans les armoires à pharmacie ! Il semble, si l'on en croit certains articles de presse récents, que les adolescents détournent des médicaments à des fins « récréatives », voire toxicomaniaques. Oui, absolument ! C'est écrit dans le journal. Il est même question, nous dit-on, de « *purple drank* » (nom exotique pour désigner ce qu'on qualifiait autrefois de « cocktail », voire de « mélange »).

Découvrir l'eau chaude est décidément un trait du génie de notre époque. Cela fait en effet des décennies que les ados (pas les vôtres, nous vous rassurons !) s'amusent à expérimenter divers mélanges de médicaments dans l'espoir de se procurer des sensations « fortes ».

Qui se souvient par exemple du drame de l'été 1992 ? Cette année-là, deux jeunes gens de 16 et 17 ans furent retrouvés noyés, l'un dans un canal ariégeois, l'autre dans un des lacs du bois de Boulogne. Les autopsies révélèrent qu'au moment de leur décès, tous deux étaient sous l'emprise de datura (*Datura stramonium*), plante psychotrope connue depuis des lustres sous le nom ô combien évocateur d'« herbe des fous ».

Où donc s'étaient-ils procuré cette dangereuse drogue ? Tout simplement dans des pharmacies de ville qui commercialisaient des spécialités plus que centenaires, que les autorités de santé de l'époque avaient visiblement oublié d'interdire : les « cigarettes antiasthmatiques » à base de datura, de belladone et de jusquiame (rien que du bio !). Les jeunes gens se fabriquaient en douce des « tisanes de datura » aux propriétés détonantes.

L'ESSENTIEL

- **Les débats autour de l'usage thérapeutique du cannabis persistent.**
- **Pourtant, son utilisation médicale n'est pas récente.**
- **Mentionné dès la première pharmacopée chinoise, au début de notre ère, contre les rhumatismes, la goutte, le paludisme et la constipation, le cannabis arrive en France au début du XIXe siècle.**
- **En 1953, tout usage du cannabis a été interdit en France, malgré ses potentialités thérapeutiques.**

Que fit le ministère de la Santé en apprenant ces drames ? Il abrogea *illico presto* l'autorisation de mise sur le marché de ces médicaments antédiluviens et ordonna le retrait de tous les lots en circulation : réaction certes des plus sensées, mais tout de même bien tardive, quelque vingt ans après que le JAMA (*Journal of the American Medical Association*) a donné l'alerte en publiant une étude de 212 cas similaires aux États-Unis. Car le phénomène était connu depuis au moins le milieu des années 1960 : on « daturait » sans vergogne dans certaines chambres d'ado. D'ailleurs, comme vous pouvez vous en douter, on ne se limitait pas qu'au datura.

Que nous enseigne cette histoire prise parmi tant d'autres ? Que notre époque croule sous les informations et qu'elle a la mémoire bien courte. C'est d'ailleurs le propre de l'actualité chaude et addictive de nous plonger dans un perpétuel présent où chaque événement n'advient que pour en chasser un autre.



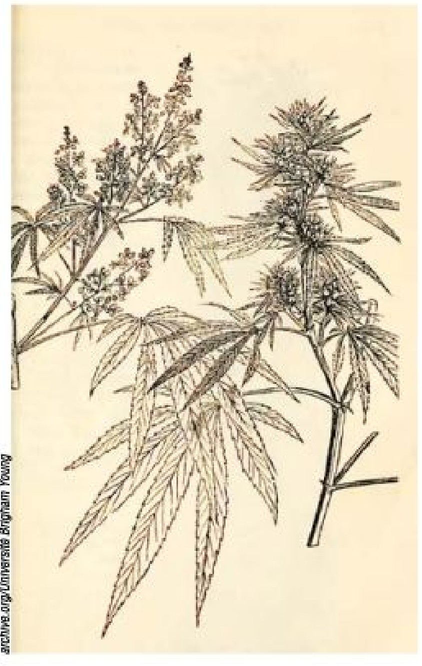
http://antiquecannabisbook.com

Le cannabis bientôt en pharmacie

Ce qui relève du médicament ne déroge pas à la règle : pas un jour sans une découverte fabuleuse, sans une alerte retentissante, sans un drame en puissance, sans une étude aux résultats contestables… Pas une année sans ouvrages aux titres ronflants : « scandale de ceci », « livre noir de cela », etc. À croire que ne régneraient autour des patients que chaos et prévarication. Mais on a oublié qu'il y a déjà plus de quarante ans paraissaient des pamphlets aux titres ressemblants (*L'Invasion pharmaceutique* et *Les Trusts du médicament*, par exemple).

Aussi n'est-il pas inutile de replacer dans leur perspective historique les préoccupations médicopharmaceutiques françaises de ces dernières années pour mieux mesurer le chemin parcouru. On s'aperçoit ainsi que la nouveauté qu'on nous vend ne s'impose le plus souvent qu'au prix de notre amnésie collective. Le cas du cannabis thérapeutique, dont on nous annonce l'arrivée prochaine et « révolutionnaire », est particulièrement instructif. La substance se trouvait déjà dans les pharmacies il y a un siècle et demi !

Verrez-vous un jour des médicaments extraits du cannabis dans votre pharmacie ? C'est plus que probable depuis qu'un décret en a autorisé, en juin 2013, « la fabrication, le transport, l'importation, l'exportation, la détention, l'offre, la cession, l'acquisition ou l'emploi ». Jusqu'alors en effet, la commercialisation de ce genre de produit était strictement interdite en France, sauf dans le cadre d'autorisations temporaires d'usage (ATU) délivrées au compte-gouttes.


archive.org/Université Brigham Young

LE CHANVRE *(Cannabis sativa)* faisait partie des plantes répertoriées par Charles Saffray dans *Les Remèdes des champs*, paru en 1883 *(à gauche)*. Le médecin et botaniste français y explique que « l'infusion des feuilles de chanvre (30 à 60 grammes par litre) a donné de bons résultats dans les rhumatismes chroniques et les dartres » et « agit comme diurétique et sudorifique ». Le chanvre indien *(variété indica)*, quant à lui, était prescrit à la même époque sous forme de cigarettes contre l'asthme, les bronchites et les maladies du poumon *(ci-dessus)*…

Mieux, le Sativex, un spray buccal à base de tétrahydrocannabinol (THC) et de cannabidiol (deux substances chimiques

omniprésentes dans le chanvre indien), a reçu le 8 janvier 2014 une autorisation de mise sur le marché (AMM) pour une indication pour l'heure très ciblée : la spasticité (c'est-à-dire des contractures très invalidantes) liée à la sclérose en plaques, « après échec des autres thérapeutiques ». Quelques centaines de patients pourraient se voir prescrire cette spécialité à court ou moyen terme. À l'heure où nous écrivons, seul un désaccord financier entre le Comité économique des produits de santé (CEPS), chargé de fixer les prix des médicaments en France, et le laboratoire espagnol Almirall, responsable de la commercialisation européenne du Sativex, explique l'indisponibilité de ce remède dans nos officines : à la mi-2015, le CEPS proposait un prix de 60 euros par boîte, alors qu'Almirall en réclamait pour sa part 350 !

Cette prochaine libéralisation ne fait cependant pas l'unanimité. En janvier 2013, pressentant la décision ministérielle, Jean Costentin, président du Centre national de prévention, d'études et de recherches en toxicomanie (CNPERT, profondément antiabolitionniste), avait dénoncé de « faux médicaments », « triste caricature d'avancées thérapeutiques majeures ».

LES AUTEURS





Thierry LEFEBVRE est maître de conférences à l'université Paris-Diderot et directeur de la *Revue d'histoire de la pharmacie*.

Cécile RAYNAL est pharmacienne et membre de la Société d'histoire de la pharmacie.

Aussi, rassurez-vous : il ne sera pas possible de se procurer ce médicament – et ceux qui suivront très certainement après lui – en libre-service, entre les produits cosmétiques et les pastilles pour la toux. À l'instar de la morphine et de la méthadone, toutes ces spécialités devront respecter le cadre légal imposé aux stupéfiants : elles devront être prescrites dans des règles de prescription strictes ; les données relatives à la délivrance seront archivées pendant dix ans et seront susceptibles d'être contrôlées à tout moment par des inspecteurs de santé publique ; toute détention non justifiée par un prétendu patient fera l'objet de poursuites pénales, les sanctions pouvant aller jusqu'à un an de prison et 3 750 euros d'amende.

La France à la traîne

Comme vous pouvez vous en douter, l'arrivée programmée de ces médicaments d'un genre spécial n'a pas manqué de susciter quelques polémiques, dans un pays encore largement hostile à tout ce qui pourrait s'apparenter, de près ou de loin, à une dépénalisation de l'usage des drogues, même celles qualifiées de « douces ». La France est en effet loin d'être en pointe dans ce domaine sensible. L'Association internationale pour le cannabis médical (IACM), fondée à Cologne en 2000, avait pourtant réussi à faire bouger les lignes en Europe : les Pays-Bas (2003) et l'Allemagne (2008) furent les premiers à s'engager. Fin 2015, outre ces deux pays, de nombreux autres États du Vieux Continent s'étaient émancipés : Pologne, Suède, Norvège, Italie, Autriche, Hongrie, République tchèque, Slovaquie, Belgique, Suisse, Islande, Luxembourg, Portugal, Royaume-Uni et Danemark. Sans oublier le Canada,

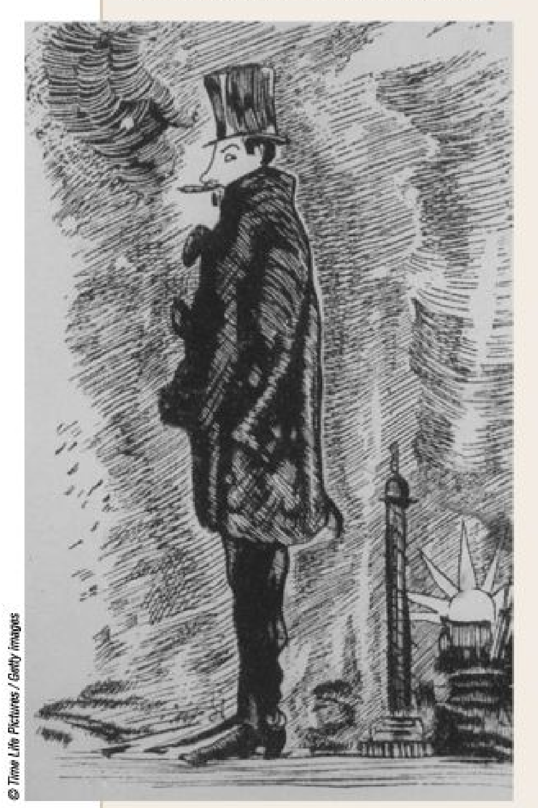


LES SIROPS CONTRE LA TOUX contenant du cannabis se sont multipliés au tournant du XXe siècle aux États-Unis, telle la mixture du Dr Macalister, composée de cannabis, de chloroforme et d'alcool, et préconisée tant pour les adultes que pour les enfants...

Boulettes, dawamesk et haschischine

« L'*extrait gras* du haschisch, tel que le préparent les Arabes, s'obtient en faisant bouillir les sommités de la plante fraîche dans du beurre avec un peu d'eau. On fait passer, après évaporation complète de toute humidité, et l'on obtient ainsi une préparation qui a l'apparence d'une pommade de couleur jaune verdâtre, et qui garde une odeur désagréable de haschisch et de beurre rance. Sous cette forme, on l'emploie en petites boulettes de deux à quatre grammes ; mais à cause de son odeur répugnante, qui va croissant avec le temps, les Arabes mettent l'extrait gras sous la forme de confitures.

La plus usitée de ces confitures, le *dawamesk*, est un mélange d'extrait gras, de sucre et de divers aromates, tels que vanille, cannelle, pistaches, amandes, musc. Quelquefois même on y ajoute un peu de cantharide, dans un but qui n'a rien de commun avec les résultats ordinaires du haschisch. Sous cette forme nouvelle, le haschisch n'a rien de désagréable, et on peut le prendre à la dose de quinze, vingt et trente grammes, soit enveloppé dans une feuille de pain à chanter, soit dans une tasse de café.



© Time Life Pictures / Getty images

BAUDELAIRE goûta au haschisch à 22 ans. De cette expérience, il retira cet autoportrait dessiné sous son emprise et une bonne colique. Participant occasionnel du Club des Haschischins, il préférait l'opium, qui le soulageait des douleurs intestinales dues à la syphilis.

Les expériences faites par MM. Smith, Gastinel et Decourtive ont eu pour but d'arriver à la découverte du principe actif du haschisch. Malgré leurs efforts, sa combinaison chimique est encore peu connue ; mais on attribue généralement ses propriétés à une matière résineuse qui s'y trouve en assez bonne dose, dans la proportion de dix pour cent environ. Pour obtenir cette résine, on réduit la plante sèche en poudre grossière, et on la lave plusieurs fois avec de l'alcool que l'on distille ensuite pour le retirer en partie ; on fait évaporer jusqu'à consistance d'extrait ; on traite cet extrait par l'eau, qui dissout les matières gommeuses étrangères, et la résine reste alors à l'état de pureté.

Ce produit est mou, d'une couleur verte foncée, et possède à un haut degré l'odeur caractéristique du haschisch. Cinq, dix, quinze centigrammes suffisent pour produire des effets surprenants. Mais la haschischine, qui peut s'administrer sous forme de pastilles au chocolat ou de petites pilules gingembrées, a, comme le dawamesk et l'extrait gras, des effets plus ou moins vigoureux et d'une nature très variée, suivant le tempérament des individus et leur susceptibilité nerveuse. Il y a mieux, c'est que le résultat varie dans le même individu. Tantôt ce sera une gaieté immodérée et irrésistible, tantôt une sensation de bien-être et de plénitude de vie, d'autres fois un sommeil équivoque et traversé de rêves. Il existe cependant des phénomènes qui se reproduisent assez régulièrement, surtout chez les personnes d'un tempérament et d'une éducation analogues ; il y a une espèce d'unité dans la variété qui me permettra de rédiger sans trop de peine cette monographie de l'ivresse dont j'ai parlé tout à l'heure. »

Charles Baudelaire, « Le Poème du haschisch », dans *Les Paradis artificiels*, 1860

l'Australie, la Nouvelle-Zélande, l'Uruguay et vingt-trois États américains. Signe de l'évolution en cours : le 22 décembre 2015, c'était au tour de la Colombie de légaliser l'usage du cannabis et de ses dérivés à des fins médicales.

Malgré ces signaux encourageants, on sent les pouvoirs publics français et le législateur encore assez crispés sur cette question, que l'on peut qualifier de sociétale. Assurément, les effets inhibiteurs de la loi n° 70-1320 du 31 décembre 1970, qui renforça de façon drastique la lutte contre l'usage illicite des « substances vénéneuses », se font encore sentir, près d'un demi-siècle après son vote unanime par une assemblée quasi déserte.

Pourtant – le saviez-vous ? –, le chanvre indien a longtemps figuré dans nos pharmacopées, et cela dans une indifférence quasi générale. La culture du chanvre indien prit son essor sur les pentes de l'Himalaya il y a plus de 5000 ans. Rapidement adoptée par les chamanes, la plante se mit à faire des émules dans d'autres contrées. Au début de notre ère, elle est mentionnée dans la première pharmacopée chinoise (*Shennong bencao*) : ses extraits étaient censés s'avérer efficaces contre les rhumatismes, la goutte, le paludisme, mais également la constipation. Ils figuraient même dans la composition d'un « élixir d'immortalité » dont les effets se font toujours attendre !

Le chanvre indien se répandit progressivement à travers l'Égypte, la Grèce et dans l'Empire romain. Le Portugais Garcia da Orta, considéré comme le fondateur de la médecine tropicale, décrivit assez précisément la plante sous le nom de « bangue ». Son ouvrage fameux, *Coloquios dos simples e drogas he cousas mediçinais da India* (Goa, 1563), lui consacre quatre pages. Quant au célèbre naturaliste Carl von Linné, il lui attribua le nom savant de *Cannabis sativa* dans son *Species Plantarum* de 1753.

Du haschisch pour traiter la peste

On considère généralement que le cannabis fut importé en France par des soldats de Bonaparte, au retour de leur campagne d'Égypte (1798-1801), à l'évidence pour des usages personnels et « récréatifs ». Louis-Rémy Aubert-Roche, futur médecin en chef de la Compagnie universelle du canal maritime de Suez, l'auto-expérimenta en Afrique du Nord au milieu des années 1830.

Le haschisch était alors consommé sous forme de tablettes sucrées « d'une couleur verdâtre, ayant un goût fade, mais très bien masqué par les pistaches et les essences de rose et de jasmin ». Le médecin apprécia le « *dolce far niente* le plus complet » et les effets psychotropes qui résultèrent de son ingestion. Il fut le premier en France à préconiser l'usage médical de ce produit alors entouré d'une aura de mystère : « Je signale donc cette substance qui peut devenir très utile en médecine ; je crois qu'elle n'est pas un médicament à négliger. Ceux qui l'expérimenteront, reconnaîtront très vite sa valeur thérapeutique, soit dans la peste, soit dans d'autres maladies. »

En 1845, Jacques-Joseph Moreau (passé à la postérité sous le surnom de Moreau de Tours, puisqu'il était natif d'Indre-et-Loire) fit paraître *Du hachisch et de l'aliénation mentale*, considéré aujourd'hui comme un des ouvrages fondateurs de la psychopharmacologie (c'est-à-dire l'étude scientifique des produits psychotropes). Il y postulait l'identité du rêve et de la folie, et prônait l'usage du cannabis pour accéder au « rêve sans sommeil » : « J'avais vu dans le hachisch, ou plutôt dans son action sur les facultés morales, un moyen puissant, unique, d'exploration en matière de pathologie mentale ; je m'étais persuadé que par elle on devait pouvoir être initié aux mystères de l'aliénation, remonter à la source cachée de ces désordres si nombreux, si variés, si étranges qu'on a l'habitude de désigner sous le nom collectif de folie. »

Le Club des Haschischins

Comme Aubert-Roche, Moreau de Tours pratiqua l'auto-expérimentation, puis il distribua avec largesse son précieux viatique. Sur ses recommandations, de nombreux autres médecins le consommèrent à leur tour.

La fortune artistique du haschisch fut assez exceptionnelle : le romancier et poète Théophile Gautier l'expérimenta en juillet 1843, lui aussi à l'initiative de Moreau de Tours, qu'il qualifiait de « déterminé mangeur de hachich ». Le récit circonstancié et probablement enjolivé de ses auto-observations parut dans le quotidien *La Presse* : « Autour de moi, c'étaient des ruissellements et écoulements de pierreries de toutes couleurs, des arabesques, des ramages sans cesse renouvelés, que je ne saurais mieux comparer qu'aux jeux du kaléidoscope. »

De 1844 à 1849, le « Club des Haschischins » (le nom faisait référence à une secte shi'ite du début du XIe siècle) prit l'habitude de se réunir dans l'hôtel de Lauzun, dans l'appartement du peintre Fernand Boissard : outre Gautier, Alexandre Dumas, Gérard de Nerval, Eugène Delacroix, Honoré de Balzac, Charles Baudelaire, etc., le fréquentèrent avec plus ou moins d'assiduité. Tout le gratin littéraire et artistique de l'époque ! Le célèbre « Poème du haschisch », première partie des *Paradis artificiels* de Charles Baudelaire, en fut un des aboutissements littéraires les plus remarquables *(voir l'encadré page ci-contre)*. Mais cette production artistique se poursuivit bien au-delà, comme en témoignèrent par exemple, au milieu du XXe siècle, les écrits d'Henri Michaux.

Dans certaines officines, entre 1860 et le début du XXe siècle, on pouvait se procurer en toute impunité les « cigarettes indiennes » au chanvre indien de Grimault et Cie, pharmaciens à Paris


ASTHME

CIGARETTES DE GRIMAULT & Cie

au Cannabis indica

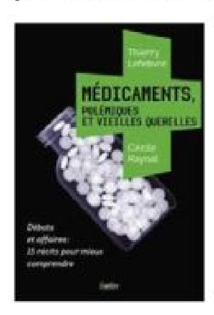
Le plus efficace des moyens connus pour combattre l'**asthme, l'oppression, la toux nerveuse, les névralgies, l'insomnie**. Paris, pharmacie, 9, rue Vivienne.

A MONTPELLIER, Gely, Coulougerac, et Martin, droguistes et dans toutes pharmacies.

Dans la première moitié du XIXe siècle, les usages « récréatifs » du cannabis s'accommodaient d'une sorte de « confiture verte », le dawamesk, mélange de beurre légèrement rance et de haschisch, parfois additionné d'opium, et aromatisé à l'aide de miel, de pistache, d'amande douce, de vanille ou de cannelle. En revanche, ses usages pharmacologiques se voulaient plus rigoureux : le chanvre indien, l'extrait de chanvre indien *(Extractum cannabis indicæ)* et la teinture de chanvre indien *(Tinctura cannabis indicæ)* firent leur entrée dans la troisième édition de la *Pharmacopée française* (ouvrage de référence pour l'exercice de la pharmacie), en 1866, une quinzaine d'années après leur adoption par la *Pharmacopée américaine*. Ces trois substances, qualifiées de « médicamenteuses », s'y maintinrent dans les quatre éditions suivantes (1884-1895, 1908, 1937 et 1949). Autant dire que ces produits et leurs usages étaient parfaitement admis par les autorités de santé. Et cela pendant près d'un siècle !

En 1891, le pharmacien Eusèbe Ferrand récapitulait les avantages supputés du haschisch dans son *Aide-mémoire de pharmacie* : « À dose faible, il stimule le système

CET ARTICLE est l'association d'une partie de l'avant-propos et du chapitre « Cannabis : le retour en grâce » du livre de Thierry Lefebvre et Cécile Raynal, *Médicaments, polémiques et vieilles querelles*, Belin (2016). Mediator, vaccination, médicaments génériques, homéopathie, sont quelques-uns des autres thèmes que les auteurs passent au crible de l'histoire.



nerveux sensitif et moteur ; il active l'intelligence ; il est aussi un peu aphrodisiaque. À dose plus forte, il produit l'anesthésie générale, avec résolution musculaire et un peu de catalepsie [...]. On emploie le haschisch comme sédatif, hypnotique, dans le choléra, la chorée, la manie hypocondriaque ; on le substitue à l'opium chez les sujets qui ne peuvent supporter ce médicament. »

Dans certaines officines, entre 1860 et le début du XX[e] siècle, on pouvait également se procurer en toute impunité les « Cigarettes indiennes » au chanvre indien de Grimault et Cie, pharmaciens à Paris. Elles étaient « indiquées dans l'asthme et les affections des bronches et du poumon » ; et étaient « fort usitées en Allemagne et employées en France avec succès par un grand nombre de praticiens ». Il en coûtait deux francs l'étui en 1877. Vers la même époque, les « Cigarettes Giniez » offraient un curieux mélange de cannabis, de belladone et de camphre !

Avec le recul, une telle liberté d'usage laisse songeur. C'est oublier cependant que la consommation était réduite et relativement circonscrite. Hormis Aubert-Roche, Moreau de Tours et une poignée d'autres, les prescripteurs ne semblaient guère convaincus de la pertinence de ce produit, dont les effets étaient bien moins marqués que l'opium et la morphine (alcaloïde très actif contre la douleur, isolé en 1804 de l'opium par l'Allemand Friedrich Wilhelm Sertürner).

Soixante ans de prohibition

Les premières restrictions advinrent au tout début des années 1910 aux États-Unis, tout d'abord à La Nouvelle-Orléans où la consommation, à l'époque limitée aux Afro-Américains et aux émigrés mexicains, commençait à devenir problématique (apparition de trafics illicites, pratiques toxicomaniaques, etc.). À l'instar de l'opium et de ses dérivés, ainsi que de la cocaïne, le chanvre indien et ses préparations pharmaceutiques figurèrent au menu de la Convention internationale relative aux stupéfiants, signée le 19 février 1925 à Genève par 36 pays, dont la France, l'Allemagne et le Royaume-Uni. L'Acte fut promulgué en France le 31 octobre 1928. Il y était précisé : « Les parties contractantes édicteront des lois ou des règlements efficaces, de façon à limiter exclusivement aux usages médicaux et scientifiques la fabrication, l'importation, la vente, la distribution, l'exportation et l'emploi [de ces] substances [...]. Elles coopéreront entre elles afin d'empêcher l'usage de ces substances pour tout autre objet. » Pour le haschisch et ses composants, la situation d'alors n'est pas sans rappeler celle qui est redevenue de mise en France depuis le 5 juin 2013 !

Le chanvre indien, sa résine, son extrait et sa teinture furent classés au tableau B des stupéfiants à la suite du décret du 20 mars 1930 ; puis ils furent définitivement expulsés des pharmacies françaises en application du décret du 27 mars 1953. Il y était précisé : « Sont interdits : l'importation, l'exportation, la production, le commerce et l'utilisation du chanvre indien et des préparations en contenant ou fabriquées à partir du chanvre indien. » La consommation étant à l'époque assez marginale, la décision passa relativement inaperçue.

En conséquence de quoi, ces produits disparurent de l'édition postérieure de la *Pharmacopée française*, annonçant une longue éclipse de plus d'un demi-siècle.

Aujourd'hui, la prohibition des trafics illicites est toujours de mise en France, mais pourtant le cannabis reste omniprésent dans nos médias, dans nos villes et nos campagnes. Au détour d'une rue, il n'est pas rare d'en croiser l'effluve, comme il en est d'un parfum entêtant. Le lieu n'est pas ici de juger de l'efficacité ou de l'inefficacité des politiques restrictives menées tout au cours du XX[e] siècle. Mais la médecine devait-elle pour autant se priver des potentialités pharmacologiques d'une plante à la réputation plurimillénaire ? Sûrement pas !

La funeste erreur de mars 1953 étant aujourd'hui en partie réparée, il reste à espérer que les nombreux essais cliniques menés depuis quelques années, en particulier aux États-Unis, sur les quelque 400 composés (dont 61 cannabinoïdes spécifiques) du *Cannabis sativa*, porteront un jour leurs fruits : cancers métastatiques, prémédication de l'anesthésie, troubles bipolaires, maladies inflammatoires chroniques de l'intestin, etc., sont désormais dans le collimateur des chercheurs...

Pour l'heure, une chose est sûre : beaucoup de médecins s'interrogent sur la réelle efficacité de ces produits et il n'y a pas véritablement de consensus à leur sujet. Il revient désormais aux chercheurs et cliniciens de séparer le bon grain de l'ivraie ! ■

■ BIBLIOGRAPHIE

L.-R. Aubert-Roche, **De la peste ou typhus d'Orient, documents et observations [...]. Suivi d'un Essai sur le hachisch et son emploi dans le traitement de la peste,** Librairie médicale Just Rouvier, 1840.

J.-J. Moreau (de Tours), **Du hachisch et de l'aliénation mentale. Études psychologiques,** Masson et Cie, 1845.

A. Brierre de Boismont, **Des hallucinations ou Histoire raisonnée des apparitions, des visions, des songes, de l'extase, du magnétisme et du somnambulisme,** Germer Baillière, 1845.

Pour un usage du **cannabis** comme antidouleur

Bernard Calvino

Le cannabis est au cœur d'un débat de société. Mais on sait maintenant qu'il s'agit d'un antalgique possible. Lorsque les traitements classiques échouent, les cannabinoïdes devraient être une solution possible prescriptible.

Doit-on autoriser l'utilisation du cannabis ou de ses dérivés (les cannabinoïdes) en pharmacologie clinique? Passionné et passionnel, le débat relève de plusieurs questions. De quelles molécules parle-t-on? Quel mode d'administration préconise-t-on? Y a-t-il des dangers potentiels en fonction de l'utilisation de telle molécule, selon tel mode d'administration? Ces questions ne sont pas neutres, car elles en cachent une autre que personne n'ose poser: y a-t-il de bonnes raisons d'autoriser à fumer du cannabis ou d'utiliser ses produits dérivés à des fins thérapeutiques reconnues, sans parler bien sûr de l'autorisation à des fins récréatives? Si la réponse se révélait positive, l'interdit social et politique qui frappe cette pratique jugée dangereuse par et pour la société – car les dérivés du cannabis sont considérés comme des drogues hédoniques, c'est-à-dire activant le système de récompense du cerveau – aurait du plomb dans l'aile, au moins pour des fins thérapeutiques.

En mai 1998, un groupe de travail présidé par Bernard Roques, professeur à la faculté de pharmacie de Paris, a rédigé un rapport au secrétaire d'État à la Santé Bernard Kouchner sur les «Problèmes posés par la dangerosité des drogues», dans lequel il a comparé l'héroïne, la cocaïne, les hallucinogènes, les psychostimulants, l'alcool, le tabac et le cannabis en partant du préliminaire qu'aucune de ces molécules n'était dépourvue de danger puisque toutes sont hédoniques, et donc susceptibles d'entraîner des effets de dépendance physique et psychique. Ce rapport a abouti à un classement en trois groupes: le premier, le plus dangereux, comprend l'héroïne, la cocaïne et l'alcool; le second, les psychostimulants, les hallucinogènes et le tabac; et le troisième, plus en retrait, le cannabis.

En effet, selon les critères scientifiques et cliniques que le groupe de travail a établis, le cannabis n'induit qu'une faible dépendance physique (l'alcool une très forte et le tabac une forte) et psychique (l'alcool et le tabac une très forte), n'a aucune neurotoxicité (comme le tabac, alors que celle de l'alcool est forte), une très faible toxicité générale (l'alcool une forte et le tabac une très forte, liée au cancer), une faible dangerosité sociale (l'alcool une forte et le tabac aucune). Et pourtant, l'alcool et le tabac sont consommés librement et rapportent de substantiels bénéfices à l'État par l'intermédiaire des taxes qui pèsent sur ces produits, tout en creusant le déficit de la Sécurité sociale, et alors même que l'on ne se pose aucune question sur un éventuel «bénéfice thérapeutique», ni aucun problème concernant une éventuelle dangerosité sociale liée à la consommation de ces molécules.

Ce rapport montre à quel point le problème posé par la dépénalisation de l'usage thérapeutique du cannabis repose plus sur des jugements de valeur moraux imposés par la société (interdit d'une certaine forme de plaisir que procurent les drogues hédoniques) que sur une analyse objective des données. Qu'on en juge.

Le cannabis est un mélange complexe extrait de feuilles séchées et du cœur de fleurs de la plante *Cannabis sativa*, variable selon les souches génétiques et le milieu de culture. On a ainsi répertorié 421 composés chimiques, dont 61 constituent les cannabinoïdes, des molécules qui activent un groupe de récepteurs du système nerveux des mammifères, le système cannabinoïde endogène. Depuis quelques dizaines d'années, le cannabis fait l'objet d'un regain d'intérêt thérapeutique *via* des propriétés de son principe actif majeur, le tétrahydrocannabinol (THC), sur le système nerveux. Ce cannabinoïde a des effets psychotropes, antalgiques et antispasmodiques, stimule l'appétit, empêche les vomissements et agit sur l'émotion. À fortes doses, il détériore la mémoire et les mouvements. De récents travaux ont montré que le THC jouerait aussi un rôle anti-inflammatoire par son action sur le système immunitaire, ce qui présenterait un intérêt clinique important si ces résultats étaient confirmés.

De nombreux travaux précliniques ont mis en évidence que les cannabinoïdes présentent chez l'animal une activité antalgique dans des modèles de douleur aiguë, mais aussi de douleurs chroniques inflammatoires et neuropathiques. Plusieurs études cliniques ont quant à elles montré que le THC aurait un intérêt dans le traitement des douleurs chroniques neuropathiques. L'effet serait limité contre la douleur, mais significatif pour améliorer la qualité de vie, principalement le sommeil. Ainsi, aux États-Unis et dans les pays anglosaxons, où le THC est surtout utilisé comme stimulant de l'appétit chez les patients atteints du sida et comme antivomitif chez ceux soumis à des chimiothérapies anticancéreuses, il est aussi prescrit pour soulager les douleurs chroniques neuropathiques chez les patients insensibles aux autres thérapies antalgiques.

Dépourvu d'effets secondaires à faible dose, le THC pourrait aussi, associé à des morphiniques, renforcer l'action de ces derniers et ainsi éviter l'escalade des morphiniques en cas d'accoutumance. Son principal intérêt clinique, cependant, réside dans la sclérose en plaques, tant pour traiter les douleurs chroniques que pour diminuer la spasticité neurogène, les spasmes musculaires et les dysfonctionnements urinaires, et améliorer la qualité de vie (sommeil et appétit). Attention néanmoins, son utilisation intensive à l'adolescence présente un danger de détérioration de fonctions cognitives telles que la mémoire de travail et la flexibilité mentale, associée parfois à une baisse du quotient intellectuel, selon des données récentes qui nécessitent cependant une confirmation sur un nombre plus important de sujets.

En 2014, l'Agence française de sécurité du médicament a autorisé la mise sur le marché du premier médicament à base de deux composés dérivés du cannabis, le Sativex. Ce spray sublingual associe le THC et le cannabidiol, une molécule qui, sans être psychoactive, présente des effets anticonvulsivants et sédatifs. Le cannabidiol limite les effets euphorisants et le sentiment d'ébriété du THC, réduisant ainsi le risque d'abus et de dépendance à ce médicament. La plupart des études cliniques ont montré que le Sativex améliore la qualité de la vie, principalement le sommeil, et agit plus sur la douleur que l'effet placebo. Il est aussi efficace, chez les patients atteints de sclérose en plaques, contre les contractures musculaires et les dysfonctionnements urinaires. Enfin, il abaisse la pression intraoculaire dans le glaucome.

Autorisée dans 23 pays, la prescription du Sativex reste pourtant, en France, limitée à six mois et surtout restreinte aux patients atteints de sclérose en plaques pour les seules douleurs de contracture. La prescription est beaucoup plus large ailleurs, comme au Canada, où le Sativex est aussi indiqué pour les douleurs neuropathiques de la sclérose en plaques, ainsi que pour le traitement analgésique d'appoint chez les adultes atteints de cancer avancé dont la douleur résiste aux traitements par opioïdes.

La question soulevée ici est celle de la pratique médicale que nous voulons. En l'état actuel des connaissances, si la médecine se doit d'accorder aux patients une attention parfaite à l'égard de leur douleur, elle ne peut garantir un succès thérapeutique total contre celle-ci. Le patient détient la vérité sur sa douleur, et le traitement de celle-ci s'inscrit dans la collaboration active entre le patient et son médecin. Et parce que la douleur est étroitement liée à la fragilité humaine, qu'elle soit biologique, psychologique ou sociale, le médecin se trouve plus que jamais dans l'obligation morale de tout mettre en œuvre pour soulager son patient. Notamment de prescrire d'autres thérapies lorsque les moyens classiques ont échoué.

Le problème posé par la dépénalisation du cannabis repose plus sur des jugements de valeur moraux que sur une analyse objective des données

L'utilisation du cannabis comme antalgique possible est maintenant bien documentée. En Israël, bien qu'il soit considéré comme une drogue illégale et dangereuse, sa culture se développe depuis 2008, car son usage médical y est autorisé pour les patients atteints de cancer, d'épilepsie, de douleurs chroniques et de certaines maladies neurologiques. Et d'ici à l'été 2016, une réforme en projet devrait y libéraliser son usage. Qu'attendons-nous pour faire de même ? Le cannabis et ses dérivés peuvent apporter un réel progrès pour soulager les douleurs chroniques neuropathiques des patients rebelles à toute autre pharmacologie antalgique. Il appartient à la société de donner aux thérapeutes cet outil avec une véritable dimension clinique et de dépasser le cadre très restrictif d'autorisation du Sativex, par ailleurs toujours en attente d'une commercialisation. ■

L'AUTEUR


Bernard CALVINO est professeur honoraire de neurophysiologie, spécialiste de la douleur.

BIBLIOGRAPHIE

J. Zajicek *et al.*, **Cannabinoids for treatment of spasticity and other symptoms related to multiple sclerosis (CAMS study) : multicentre randomized placebo-controlled trial**, *The Lancet*, vol. 362 (9395), pp. 1517-1526, 2003.

F. A. Campbell *et al.*, **Are cannabinoids an effective and safe treatment option in the management of pain ? A qualitative systematic review**, *British Medical Journal*, vol. 323, pp. 13-16, 2001.

I. D. Meng *et al.*, **An analgesia circuit activated by cannabinoids**, *Nature*, vol 395, pp. 381-383, 1998.

LOGIQUE & CALCUL

Des stratégies miraculeuses

Un bon raisonnement, aussi efficace qu'inattendu, peut vous sauver la vie ou vous faire sortir de prison… si vous êtes soumis à une épreuve analogue à celle du problème des 50 prisonniers.

Jean-Paul DELAHAYE

Certaines énigmes sont si étonnantes que leurs solutions apparaissent miraculeuses. Elles illustrent l'intérêt de l'approche mathématique et logique des problèmes, qui surmonte parfois une apparente impossibilité absolue. Le problème que nous allons présenter avec quelques variantes est de cette catégorie : avant d'en avoir la solution, vous serez probablement persuadé que ce qui est demandé est infaisable.

Le problème des 50 prisonniers

Les gardiens d'une prison promettent de libérer leurs 50 prisonniers tous ensemble s'ils réussissent l'épreuve suivante. Les gardiens écrivent les 50 noms des prisonniers sur 50 cartons. Ils placent les cartons au hasard, à raison d'un carton par boîte, dans 50 boîtes fermées et alignées sur une grande table. Les prisonniers sont conduits les uns après les autres devant les boîtes. Sans savoir ce qu'ont fait les prisonniers précédents, chaque prisonnier doit ouvrir 25 des 50 boîtes et y trouver le carton avec son nom. Les prisonniers ne peuvent déplacer ni les boîtes ni les cartons, et doivent refermer les boîtes ouvertes avant de sortir. L'épreuve n'est réussie que si chaque prisonnier trouve son nom. Avant que l'épreuve commence, les prisonniers peuvent se concerter pour convenir d'une méthode, mais une fois l'épreuve commencée, ils n'ont plus aucun échange.

Les prisonniers pourraient procéder au hasard. Par exemple, ils pourraient utiliser une loterie à 50 numéros : chaque prisonnier lancerait la loterie autant de fois qu'il le faut, et ouvrirait la boîte indiquée par la loterie (sans tenir compte des numéros tombés plusieurs fois), cela jusqu'à avoir ouvert 25 boîtes. Chacun aurait une chance sur deux de réussir, et puisque les tirages seraient indépendants, la probabilité qu'ils réussissent tous serait exactement $1/2^{50} = 8{,}881 \times 10^{-16}$, ce qui est vraiment très peu !

Ils peuvent faire beaucoup mieux et avoir une probabilité de réussite collective supérieure à 30 %. Comment ?

Le problème, sous diverses formes, est connu depuis 2003. Il a été proposé par les chercheurs danois en informatique Peter Bro Miltersen et Anna Gál, qui étaient persuadés que lorsque le nombre de boîtes augmente (il y a $2n$ prisonniers et $2n$ boîtes, chaque prisonnier pouvant ouvrir n boîtes), la probabilité de gagner tend vers 0. Leur collègue Sven Skyum les convainquit de leur erreur et leur montra que pour tout n, les prisonniers disposent d'une méthode qui leur garantit la liberté dans plus de 30 % des cas.

Prenez la peine de chercher cette méthode. Quelle est donc cette stratégie de jeu qui semble réaliser un miracle ?

Notez bien qu'il n'y a aucun doute sur l'affirmation qu'un prisonnier seul a exactement une chance sur deux de réussir à trouver son nom. En effet, les noms sont mis au hasard dans les boîtes et il en ouvre la moitié sans avoir la moindre information sur l'ordre des cartons dans les boîtes. Les prisonniers ne pouvant pas communiquer une fois l'épreuve commencée, il semble qu'ils ne peuvent que jouer au hasard indépendamment et, en conséquence, que rien ne leur permet d'avoir collectivement mieux que ce que donne la stratégie *Au hasard* qui aboutit à une chance sur 2^{50} de réussir. Cependant, ce raisonnement est faux : s'ils sont malins, les prisonniers trouveront tous leur nom dans plus de 30 % des cas.

Perdre ou gagner tous en même temps !

L'idée est que les prisonniers doivent trouver un moyen de se coordonner. Il faut qu'ils s'arrangent pour perdre souvent en même temps, s'ils veulent pouvoir souvent gagner tous en même temps. Les prisonniers ne peuvent pas communiquer, mais ils peuvent adopter des comportements corrélés et, par conséquent (et c'est là que se trouve l'erreur du raisonnement qui semblait prouver qu'on ne peut pas faire mieux que la stratégie *Au hasard*), ils peuvent faire des choix liés.

Pour expliquer la solution, nous supposerons que les noms des prisonniers sont les entiers de 1 à 50, ce qui bien sûr ne change rien au problème.

Les prisonniers opèrent de la façon suivante. Quand un prisonnier se trouve devant les boîtes, il ouvre celle correspondant à son numéro : le prisonnier numéro 1 ouvre la boîte placée au début de la ligne de boîtes, le prisonnier numéro 2 ouvre la deuxième boîte, etc. Si le prisonnier trouve son numéro dans la boîte qu'il ouvre, il s'arrête. S'il ne

Problème des 50 prisonniers : la procédure et la solution *Suivre*

Cinquante prisonniers numérotés de 1 à 50 passent les uns après les autres devant une grande table où sont alignées 50 boîtes. Ils ne peuvent pas communiquer et ignorent ce qu'ont fait les prisonniers passés avant eux. Les gardiens de la prison ont déposé au hasard des cartons numérotés de 1 à 50 dans les 50 boîtes, en mettant exactement un carton par boîte. Chaque prisonnier ouvre 25 boîtes de son choix et les referme sans toucher aux cartons qui s'y trouvent. L'ensemble des prisonniers gagne et ils sont libérés si chacun d'eux a ouvert la boîte contenant son numéro.

En jouant au hasard, les prisonniers réussiront dans 1 cas sur 2^{50} (car chacun aura dans ce cas une chance sur deux de trouver son numéro). Ils peuvent faire beaucoup mieux et gagner dans plus de 30 % des cas. Comment ?

En appliquant la stratégie *Suivre* (illustration *ci-dessous*), les $2n$ prisonniers gagnent si la permutation définie par la distribution des cartons dans les boîtes ne contient pas un cycle de taille supérieure à n. Le raisonnement mathématique montre que cela se produit pour une proportion de permutations égale à $1 - 1/(n+1) - 1/(n+2) - ... - 1/(2n)$.

Avec 4 prisonniers, on a 4! = 24 permutations possibles. Les répartitions de cycles sont :

A. Quatre cycles de taille 1

1 permutation : [1→1, 2→2, 3→3, 4→4].

B. Un cycle de taille 2 et deux de taille 1

6 permutations :

[1→2, 2→1, 3→3, 4→4]
[1→3, 2→2, 3→1, 4→4]
[1→4, 2→2, 3→3, 4→1]
[1→1, 2→3, 3→2, 4→4]
[1→1, 2→4, 3→3, 4→2]
[1→1, 2→2, 3→4, 4→3].

C. Deux cycles de taille 2

3 permutations :

[1→2, 2→1, 3→4, 4→3]
[1→3, 2→4, 3→1, 4→2]
[1→4, 2→3, 3→2, 4→1].

D. Un cycle de taille 3 et un cycle de taille 1

8 permutations :

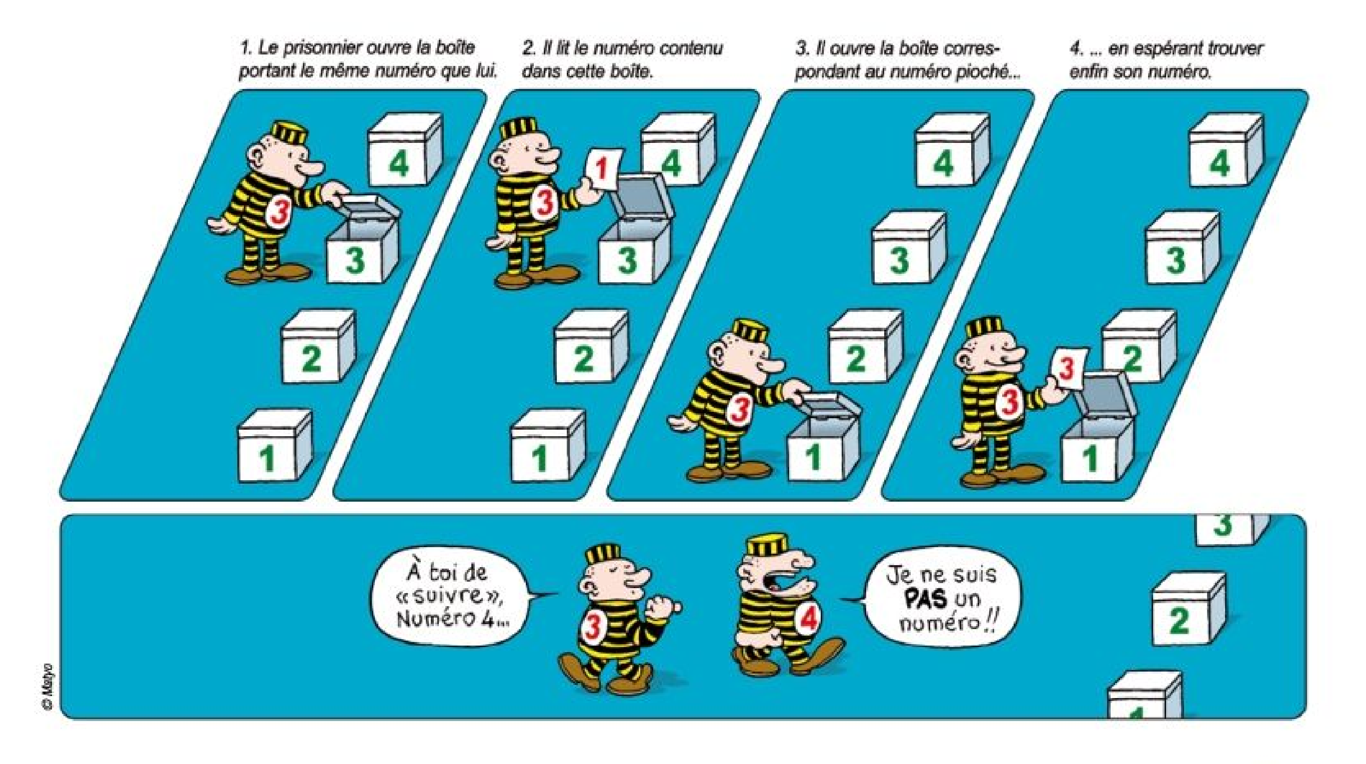
[1→1, 2→3, 3→4, 4→2]
[1→1, 2→4, 3→2, 4→3]
[1→3, 2→2, 3→4, 4→1]
[1→4, 2→2, 3→1, 4→3]
[1→2, 2→4, 3→3, 4→1]
[1→4, 2→1, 3→3, 4→2]
[1→2, 2→3, 3→1, 4→4]
[1→3, 2→1, 3→2, 4→4].

E. Un cycle de taille 4

6 permutations :

[1→2, 2→3, 3→4, 4→1]
[1→2, 2→4, 3→1, 4→3]
[1→3, 2→4, 3→2, 4→1]
[1→3, 2→1, 3→4, 4→2]
[1→4, 2→3, 3→1, 4→2]
[1→4, 2→1, 3→2, 4→3].

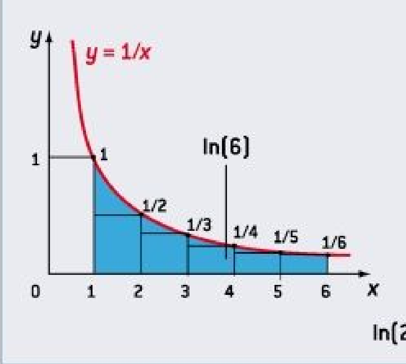
On a bien 24 permutations. Le nombre de permutations permettant de gagner est 10 = 1 + 6 + 3 (cas A, B et C). La probabilité de gagner est bien de 10/24 = 1 - 1/3 - 1/4.

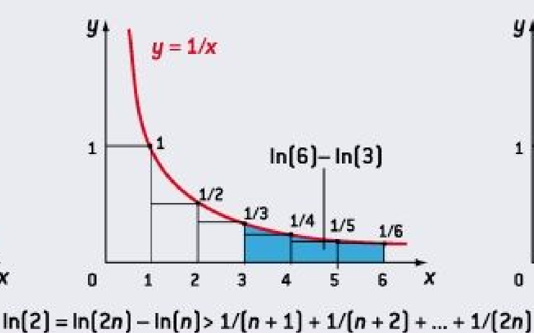


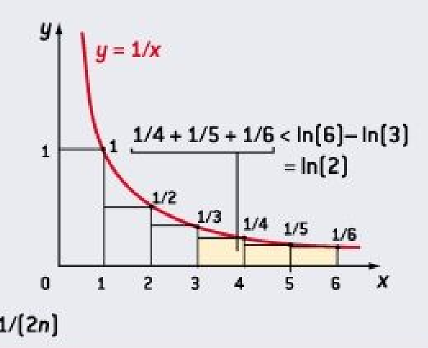
Une inégalité démontrée par un dessin

Pour prouver que, en adoptant la stratégie *Suivre*, les prisonniers ont une probabilité de gagner supérieure à 1 - ln(2) = 0,306852..., on utilise le fait que, pour tout entier n supérieur ou égal à 1, on a :
$1 - [1/(n+1) + 1/(n+2) + ... + 1/(2n)] > 1 - \ln(2)$.

Cette inégalité est équivalente à : $1/(n+1)+1/(n+2)+...+1/(2n) < \ln(2)$. Donnons une preuve graphique de ce résultat pour $n = 3$, clairement généralisable à tout entier $n \geq 2$. Le logarithme népérien de t, noté $\ln(t)$, est défini pour tout t positif comme l'aire comprise entre l'axe des x et l'hyperbole d'équation $y = 1/x$, entre l'abscisse 1 et l'abscisse t. Cela permet de visualiser ln(6) et ln(3), puis, par soustraction, ln(6) – ln(3) = ln(2). Les petits rectangles en jaune ont une aire qui vaut 1/4 + 1/5 + 1/6. Puisque l'aire en jaune est contenue dans l'aire en bleu, on a : 1/4 + 1/5 + 1/6 < ln(6) – ln(3) = ln(2).







$\ln(2) = \ln(2n) - \ln(n) > 1/(n+1) + 1/(n+2) + ... + 1/(2n)$

le trouve pas, il ouvre la boîte correspondant au numéro trouvé dans la boîte qu'il vient d'ouvrir. S'il trouve son numéro dans cette seconde boîte, il s'arrête. Sinon, il continue de la même façon : il va ouvrir la boîte correspondant au numéro qu'il vient de trouver dans la dernière boîte ouverte, et continue jusqu'à avoir ouvert 25 boîtes. Cette stratégie est la stratégie *Suivre*.

Pourquoi la stratégie *Suivre* fonctionne-t-elle ? L'explication se résume ainsi : en adoptant la stratégie *Suivre*, un prisonnier trouvera son numéro, sauf si le cycle auquel appartient son numéro dans la décomposition en cycles de la permutation des boîtes définie par les cartons qu'elles contiennent est de longueur (on dit aussi : ordre) supérieure à 25. Et les prisonniers qui adoptent tous la stratégie *Suivre* gagneront si la décomposition en cycles de la permutation ne comporte pas de cycle de longueur supérieure à 25, ce qui se produit dans plus de 30 % des cas.

Avant de justifier cette probabilité, examinons les permutations, cycles et décomposition en cycles. Une permutation de l'ensemble {1, 2, ..., p} (p étant un entier positif) est une application bijective f (ou dite aussi biunivoque ou « un à un ») de l'ensemble vers lui-même. Cette application f vérifie deux propriétés : si $a \neq b$, alors $f(a) \neq f(b)$ (propriété A) ; pour tout c entre 1 et p, il existe un unique a tel que $f(a) = c$ (propriété B).

Les cartons portant les numéros mis dans les boîtes définissent une telle permutation, car il y en a exactement un par boîte. Si l'on a par exemple 6 prisonniers ($n = 3$) et que les cartons sont mis dans l'ordre 2-4-5-1-3-6, l'application bijective f est celle qui à 1 associe 2, à 2 associe 4, à 3 associe 5, à 4 associe 1, à 5 associe 3, et à 6 associe 6 : $f(1) = 2, f(2) = 4, f(3) = 5, f(4) = 1, f(5) = 3, f(6) = 6$.

Pas de cycles trop longs dans la permutation

Observons le prisonnier 1 qui applique la stratégie *Suivre* : il ouvre la boîte 1 et y trouve le carton 2 ; il ouvre donc la boîte 2 où il trouve le carton 4 ; il ouvre donc la boîte 4 où il trouve le carton 1. Il s'arrête, il a réussi. Le prisonnier 2, lui, tombe sur 4, puis 1, puis 2. Il réussit aussi. On vérifie que tous les prisonniers réussissent, car la stratégie *Suivre* les envoie dans le cycle $1 \to 2 \to 4 \to 1 \to 2 \to 4$ pour les prisonniers 1, 2 et 4, dans le cycle $3 \to 5 \to 3 \to 5$ pour les prisonniers 3 et 5, et dans le cycle $6 \to 6$ pour le prisonnier 6.

La permutation considérée ici se décompose en trois cycles de longueurs respectives 3, 2 et 1. Ce type de décompositions en cycles est général : toute permutation d'un ensemble fini dans lui-même se décompose en un nombre fini de cycles.

Pour le démontrer, c'est assez simple. En partant de x et en suivant les entiers successifs $f(x), f(f(x)), f(f(f(x)))$, ..., on finit par retomber sur un entier y déjà obtenu, car il n'y a qu'un nombre fini d'entiers considérés par la permutation. Considérons le premier entier y déjà obtenu sur lequel on retombe. C'est nécessairement x, car si c'était un autre entier, celui-ci serait obtenu de deux façons différentes (par l'entier qui a donné y la première fois, et par celui qui y amène la deuxième fois), ce qui est impossible puisque f étant bijective, tout élément n'a qu'un seul antécédent (propriété B). Tout entier x appartient donc à un cycle. La permutation se décompose ainsi en plusieurs cycles, qui sont bien sûr disjoints, et qui sont tels que la somme de leur taille (le nombre de leurs éléments) est p.

Dans notre histoire des 50 prisonniers, si tous utilisent la stratégie *Suivre*, alors ils gagnent quand il n'y a aucun cycle de longueur supérieure à 25. S'il existe un cycle de longueur 50, ils perdent tous. Dans les autres cas, par exemple si on a un cycle de longueur 30 et d'autres cycles (nécessairement de longueur inférieure à 20 = 50 – 30), il y aura autant de prisonniers perdants que d'éléments du plus grand cycle, et les prisonniers perdront collectivement *(voir l'encadré page 79, qui détaille le cas de 4 prisonniers)*. Le problème se ramène donc à calculer combien de permutations de l'ensemble à 50 éléments ont un cycle de longueur supérieure à 25.

La probabilité de gagner des 50 prisonniers

Nous allons montrer que la probabilité qu'une permutation des entiers $\{1, 2, 3, ..., 2n\}$ ne contienne pas de cycle de longueur supérieure à n est supérieure à $1 - \ln(2)$ (où ln désigne le logarithme népérien), soit 0,306852... Cela montrera que la probabilité que les prisonniers gagnent est supérieure à 30 %.

Soit k un entier tel que $n < k \leq 2n$. Évaluons le nombre de permutations ayant un cycle d'ordre k parmi les $(2n)!$ permutations possibles de l'ensemble $\{1, 2, 3, ..., 2n\}$. Il y a $C(2n, k) = (2n)!/((2n-k)!k!)$ façons de choisir les entiers du cycle. Le nombre $C(2n,k)$ est le nombre de combinaisons de k éléments pris parmi $2n$. Il y a $(k-1)!$ façons d'ordonner les k entiers choisis en un cycle, et il y a $(2n-k)!$ façons de classer les autres entiers pour déterminer la permutation. Le nombre total de permutations de $\{1, 2, 3, ..., 2n\}$ ayant un cycle d'ordre k supérieur à n est donc : $[(2n)!/((2n-k)!k!)] \times (k-1)! \times (2n-k)! = (2n)!/k$. Il s'ensuit que la probabilité de tomber sur une permutation ayant un cycle d'ordre k est $1/k$.

Par conséquent, la probabilité qu'il n'y ait aucun cycle d'ordre k supérieur à n est $1 - [1/(n+1) + 1/(n+2) + ... + 1/2n] = 1 - H(2n) + H(n)$, où $H(i) = 1 + 1/2 + ... + 1/i$. On sait que $H(i)$ vaut à peu de chose près $\ln(i)$. La probabilité recherchée vaut donc approximativement $1 - \ln(2n) + \ln(n) = 1 - \ln(2) = 0{,}306852...$

Démonstration d'optimalité

La magnifique démonstration qui suit est due à Eugene Curtin et Max Warshauer. Elle prouve qu'il est impossible de faire mieux que la stratégie *Suivre*. Nous considérons une variante du jeu où les prisonniers procèdent comme pour le jeu initial, mais s'arrêtent d'ouvrir des boîtes quand ils ont trouvé leur numéro (cela ne les désavantage pas), et, surtout, ne referment pas les boîtes ouvertes.

Personne ne gagne, sauf si tout le monde gagne

Le prisonnier p bénéficie donc des informations données par les boîtes ouvertes par les prisonniers 1, 2, ..., p – 1. Cette variante rend le jeu plus facile, et donc la meilleure stratégie de jeu pour cette variante conduira à une probabilité de gagner supérieure ou égale à celle de la meilleure façon de jouer pour le jeu initial.

Jouer à cette variante équivaut à ne considérer qu'un prisonnier qui ouvre les $2n$ boîtes dans un certain ordre et qui s'arrête une première fois au bout de a_1 boîtes quand il a trouvé la boîte contenant le carton 1, puis une seconde fois après avoir ouvert a_2 boîtes quand il a trouvé le carton 2, etc. Le prisonnier a gagné si aucun des nombres a_i n'est supérieur à n.

Comme les contenus des boîtes ont été choisis au hasard par les gardiens, l'ordre d'ouverture qu'utilise le prisonnier de la variante est sans importance : toutes les façons d'ouvrir les boîtes donnent la même probabilité générale de gagner. On peut donc supposer que le prisonnier de la variante ouvre simplement les boîtes dans l'ordre où elles se présentent sur la table. Calculer sa probabilité de gagner sous cette hypothèse donnera la probabilité la meilleure de gagner pour la variante.

Prenons le cas $n = 3$, $2n = 6$. Les boîtes contiennent les cartons 6-1-2-4-3-5, dans cet ordre. Le prisonnier ouvre d'abord les boîtes contenant le 6 et le 1 (il cherche le 1). Donc $a_1 = 2$. Puis la boîte contenant le 2 (il cherche le 2) : $a_2 = 1$. Puis les boîtes contenant le 4 et le 3 (il cherche le 3) : $a_3 = 2$. Pour le 4, il n'ouvre aucune nouvelle boîte, puisque le carton 4 est déjà trouvé : $a_4 = 0$. Il ouvre ensuite les boîtes contenant le 5 (il cherche le 5) : $a_5 = 1$. Pour le 6, il n'ouvre aucune boîte nouvelle : $a_6 = 0$. Le prisonnier gagne, car à aucun moment il n'a eu plus de 3 boîtes à ouvrir pour trouver le carton suivant (chaque a_i est inférieur à 3). Nous noterons [6,1][2][4,3][5] cette séquence d'ouverture des boîtes. Une séquence de jeu perdante serait par exemple [1][3,4,5,2][6] : la deuxième recherche oblige le joueur à ouvrir 4 boîtes.

La notation adoptée pour représenter les séquences possibles pourrait être utilisée pour représenter la décomposition en cycles d'une permutation. La séquence [6,1][2][4,3][5] représenterait ainsi la permutation qui envoie 1 sur 6 et 6 sur 1, envoie 2 sur 2, envoie 4 sur 3 et 3 sur 4, et envoie 5 sur 5 (cette notation est la « forme canonique » de la permutation, voir https://fr.wikipedia.org/wiki/Permutation).

À chaque séquence de jeu de la variante correspond exactement une permutation en forme canonique et réciproquement. Il y a donc exactement autant de séquences de jeux gagnantes que de permutations dépourvues de cycles d'ordre strictement supérieur à n, c'est-à-dire $1 - H(2n) + H(n)$, où $H(i) = 1 + 1/2 + ... + 1/i$ *(voir le calcul effectué dans le texte ci contre)*. La meilleure façon de jouer à la variante du jeu, plus facile que le jeu initial, gagne donc avec une probabilité égale à celle de gagner pour les prisonniers du jeu initial appliquant la stratégie *Suivre*. La meilleure façon de jouer au jeu initial ne peut donc pas dépasser ce nombre. La stratégie *Suivre* obtient ainsi une probabilité de succès impossible à améliorer.

Les deux énigmes de Roland Yéléhada

Voici deux petits problèmes ressemblant au problème des 50 prisonniers. Ils présentent la propriété suivante, qui en fait l'intérêt : la meilleure stratégie pour les prisonniers n'est ni la stratégie *Au hasard* ni la stratégie *Suivre*. La question posée est à chaque fois : quelle est la meilleure stratégie pour les prisonniers ?

Problème 1. Il y a six prisonniers, et chacun peut ouvrir 2 boîtes. Ils sont libérés si trois au moins trouvent leur numéro.

Problème 2. Il y a six prisonniers, et chacun peut ouvrir 2 boîtes. Ils sont libérés si deux au moins trouvent leur numéro.

Commençons par le problème 2, qui est facile. Si les prisonniers utilisent la stratégie *Au hasard* (chaque prisonnier ouvre au hasard 2 boîtes différentes), ils perdront si aucun des 6 prisonniers ne trouve son numéro, $(4/6)^6$, ou si 5 ne le trouvent pas $6 \times (2/6) \times (4/6)^5$, ce qui fait au total une probabilité de perdre égale à 35,11 %. S'ils utilisent la stratégie *Suivre*, l'examen des 720 permutations (c'est fastidieux, mais on y arrive) montre qu'il y a 304 mauvais cas sur les 720. Les prisonniers ont donc 42 % de chance d'échouer. C'est pire que jouer au hasard, ce qui montre que *Suivre* n'est pas toujours intéressante. Pourtant, ils peuvent gagner dans 100 % des cas : chacun ouvre la boîte 1 et la boîte 2. Nécessairement, le prisonnier 1 trouve son numéro, et de même pour le prisonnier 2. C'était un piège !

Le problème 1 est plus difficile. La stratégie *Au hasard* (chaque prisonnier ouvre au hasard 2 boîtes différentes) fait perdre si 4, 5 ou 6 prisonniers ne trouvent pas leur numéro. Le calcul donne une probabilité de $(2/3)^6 + 6(1/3)(2/3)^5 + 15(1/3)2(2/3)^4 =$ 68,03 % d'échouer. J'ai vérifié ce résultat en faisant un programme. La stratégie *Suivre* donne un bon nombre de cas défavorables. Avec un peu de patience ou un programme, on trouve qu'il y en a 484 sur les 720 et donc que la probabilité d'échouer est 484/720 = 67,22 %. Notons que la stratégie *Chacun ouvre les boîtes 1 et 2* donne 100 % de chance d'échouer. La ruse précédente ne marche plus !

Une étude de nombreuses stratégies (à la main ou en utilisant des programmes) conduit à découvrir plusieurs stratégies qui limitent la probabilité d'échec à 66,66 % (c'est-à-dire 2/3). Voici l'une d'elles, meilleure donc que les stratégies *Au hasard* et *Suivre* : « Le prisonnier 1 ouvre les boîtes 1 et 2, le prisonnier 2 ouvre 2 et 4, le prisonnier 3 ouvre 3 et 6, le prisonnier 4 ouvre 1 et 2, le prisonnier 5 ouvre 2 et 4, le prisonnier 6 ouvre 3 et 6. »

Quel est le secret de cette coordination étrange qui fait mieux que le hasard et *Suivre* ? Peut-on faire encore mieux ? On l'ignore encore aujourd'hui. Un lecteur pourra-t-il répondre ?

L'examen détaillé des inégalités montre que $1 - \ln(2)$ est une valeur par défaut de la probabilité cherchée, et donc que celle-ci est supérieure à 0,306852... *(voir l'encadré page 80)*.

Ainsi, les prisonniers ont une probabilité de réussir supérieure à 30,6852 %. Dans notre problème, on peut calculer directement cette probabilité (donc sans avoir à s'occuper d'approximation). Elle vaut :
$1 - (1/26 + 1/27 + ... + 1/50) = 0{,}31675283...$

L'idée qui explique le miracle est, répétons-le, que lorsque la permutation choisie a un cycle plus long que n, les prisonniers dont le numéro appartient à ce cycle se trompent tous. Le fait pour les prisonniers de perdre ensemble en grand nombre est l'exact inverse d'un choix au hasard qui rend indépendants les échecs des prisonniers. En concentrant les cas où ils perdent, ils concentrent les cas où ils gagnent, car chacun gagne exactement une fois sur deux (il ne peut individuellement ni faire mieux ni faire moins bien). Au mieux, cette concentration des cas gagnants pourrait donner une probabilité de réussite de 50 % (s'il n'y avait que des cas où tous sont perdants ou tous sont gagnants). Le 50 % est impossible, car on a démontré que la stratégie *Suivre* est la meilleure façon de jouer *(voir l'encadré page 81)* : il faut se contenter de 31,67 %.

Gagner une fois sur deux ?

Indiquons quelques résultats complémentaires sur ce jeu. On pourrait considérer que 30 % est un peu faible. Il serait plus sympathique de permettre aux prisonniers de gagner dans un cas sur deux. Pour cela, il faut que chacun puisse ouvrir un peu plus de 50 % des boîtes. Quelle proportion ? Un petit calcul montre que la proportion donnant 50 % est $1/\sqrt{e} = 0{,}606530...$ quand n tend vers l'infini. Dans le cas de 50 prisonniers, si l'on autorise chacun à ouvrir 30 boîtes, ils gagneront (en utilisant la stratégie *Suivre*) dans 49,57 % des cas. Si chacun peut ouvrir 31 boîtes, ils gagneront dans 52,80 % des cas.

L'intérêt de cette énigme tient aussi à ce qu'elle a permis d'en imaginer quelques autres. Bien entendu, la connaissance de la solution de la première énigme sera un avantage pour résoudre les autres. En voici une dont l'énoncé se présente assez différemment. Elle m'a été proposée par Elie Cattan.

On n'a que deux prisonniers. Les 50 boîtes contiennent des numéros de 1 à 50. Comme dans le problème précédent, les deux prisonniers peuvent convenir d'une stratégie avant l'épreuve, mais ne peuvent communiquer une fois celle-ci commencée. Le premier prisonnier entre dans la pièce, regarde le contenu de toutes les boîtes et, s'il le désire, inverse le contenu de deux boîtes, et seulement deux. Il sort. Le second prisonnier entre alors dans la pièce, les gardiens de la prison lui assignent un numéro tiré au hasard entre 1 et 50, et il doit trouver ce numéro en ouvrant au maximum 25 boîtes. S'il trouve le numéro qui lui a été donné, les deux prisonniers sont libérés, sinon ils restent en prison.

Encore une fois, le problème défie l'entendement, car on a du mal à comprendre la

stratégie que pourrait adopter le premier prisonnier sans avoir connaissance du numéro qui va être attribué au second. Pourtant, s'ils sont malins, les deux prisonniers sont sûrs (à 100 %) d'être sauvés. Voici comment faire.

Le premier prisonnier, qui a une connaissance complète de la permutation f définie par la disposition des cartons dans les boîtes, examine ses cycles. Si tous ont 25 éléments ou moins, il ne fait rien. Si l'un des cycles est d'ordre 26 ou plus (il ne peut en exister qu'un seul), il va le casser.

Pour ce faire, il prend un élément du cycle, par exemple 1, et suit les cartons comme quand on applique la stratégie *Suivre*. Il va donc à la boîte 1, puis à la boîte $f(1)$, puis à la boîte $f(f(1))$, etc. Il repère la 25e boîte du cycle, puis continue jusqu'à trouver le carton 1 dans la boîte k ($k > 25$). Il échange les cartons de la 25e boîte ouverte et de la boîte ouverte la k-ième fois. En faisant cela, le cycle auquel appartient 1 a maintenant pour longueur 25 (car la 25e boîte ramène en 1). La permutation obtenue après l'échange des cartons n'a donc aucun cycle de taille supérieure à 25. Le prisonnier 2, en appliquant la stratégie *Suivre* à partir de la boîte k, sera ainsi certain de trouver le carton k qu'on lui aura demandé, et ce quel que soit k.

D'une énigme à l'autre

La variante suivante se présente très simplement et n'implique que très peu de personnages. Inspirée du problème du Monty Hall, elle a été proposée par Adam Landsberg, du Scripps College, aux États-Unis, et Eric Grunwald, de Londres.

Un jeu télévisé est organisé. Trois rideaux sont disposés sur la scène. L'un cache une voiture, un autre une clé, et le troisième rideau un appareil GPS. On ne sait pas dans quel ordre sont disposés les trois objets, et cet ordre a été choisi au hasard. Trois membres d'une même famille sont invités à jouer. Le premier pourra regarder derrière deux des rideaux et il doit trouver la voiture. Le second pourra regarder derrière deux des rideaux et devra trouver la clé de la voiture. Le troisième, toujours en observant derrière deux rideaux, devra trouver le GPS. Les joueurs jouent les uns après les autres, sans savoir ce qu'ont fait et vu ceux déjà passés. Ils gagnent et emportent la voiture, la clé et le GPS si chacun a trouvé ce qu'il devait trouver. En jouant au hasard, ils gagnent dans $(2/3)^3 = 29{,}629$ % des cas. Pourtant, en s'y prenant bien, ils pourraient gagner dans 2/3 des cas, soit avec une probabilité de 66,66 %. Comment ?

Ils appliquent la stratégie *Suivre* en convenant d'un ordre entre les joueurs (celui qui doit trouver la voiture est le 1, celui qui doit trouver la clé est le 2, et celui qui doit trouver le GPS est le 3) et d'un ordre des éléments à trouver (la voiture est le 1, la clé le 2, le GPS le 3). La disposition des cadeaux derrière les rideaux définit une permutation f de l'ensemble $\{1, 2, 3\}$ dans lui-même. La probabilité de perdre correspond alors au rapport entre le nombre de permutations f ayant un cycle de taille 3 et le nombre total de permutations de 3 éléments, c'est-à-dire $3! = 6$.

On peut appliquer le raisonnement général considéré plus haut (il conclut que la probabilité de perdre est $1 - 1/3$), mais un raisonnement direct est possible. En effet, les 6 permutations de 3 éléments sont : $(1\rightarrow1, 2\rightarrow2, 3\rightarrow3)$, $(1\rightarrow1, 2\rightarrow3, 3\rightarrow2)$, $(1\rightarrow2, 2\rightarrow1, 3\rightarrow3)$, $(1\rightarrow2, 2\rightarrow3, 3\rightarrow1)$, $(1\rightarrow3, 2\rightarrow1, 3\rightarrow2)$, $(1\rightarrow3, 2\rightarrow2, 3\rightarrow1)$. Deux d'entre elles ont un cycle de taille 3 : $(1\rightarrow2, 2\rightarrow3, 3\rightarrow1)$ et $(1\rightarrow3, 2\rightarrow1, 3\rightarrow2)$. Les autres n'ont que des cycles d'ordre 1 ou 2. Les joueurs gagneront donc dans 2/3 des cas.

Deux variantes à 6 prisonniers ont été proposées récemment par Roland Yéléhada, (voir l'encadré page ci-contre). Les deux problèmes ont la propriété suivante qui vous forcera à réfléchir : ni la stratégie *Au hasard* ni la stratégie *Suivre* ne sont les meilleures. Attention, l'un des deux problèmes est facile et l'autre beaucoup moins.

Dans le monde physique, les miracles sont légion (une télévision, une voiture ou un smartphone seraient des objets magiques pour un homme du XVe siècle). Dans le monde mathématique, certains miracles se produisent et ce qu'un raisonnement approximatif semblait éliminer définitivement (on ne pourrait faire mieux que la stratégie *Au hasard*) se révèle erroné pour le chercheur astucieux. De tels moments font le bonheur des mathématiciens. ■

L'AUTEUR



J.-P. DELAHAYE est professeur émérite à l'université de Lille et chercheur au Centre de recherche en informatique, signal et automatique de Lille (CRISTAL).

BIBLIOGRAPHIE

Wikipedia, **100 prisoners problem**, https://en.wikipedia.org/wiki/100_prisoners_problem

E. Grundwald, **Re: The locker puzzle**, *Mathematical Intelligencer*, vol. 32(2), p. 1, 2010.

A. S. Landsberg, **The return of Monty Hall**, *Mathematical Intelligencer*, vol. 31(2), p. 1, 2009.

A. Gál et P. Bro Miltersen, **The cell probe complexity of succinct data structures**, *Theoretical Computer Science*, vol. 379(3), pp. 405-417, 2007.

E. Curtin et M. Warshauer, **The locker puzzle**, *Mathematical Intelligencer*, vol. 28, pp. 28-31, 2006.



SCIENCE & FICTION

Le Shingouz, un extraterrestre capitalo-alcoolo-écolo

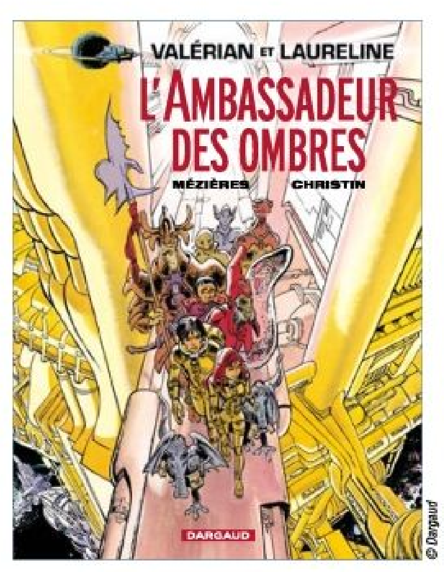
Avec des ailes de chauve-souris et un penchant pour l'alcool, ce personnage de la bande dessinée Valérian et Laureline *déploie une mosaïque de caractères bien terrestres !*

Jean-Sébastien STEYER et Roland LEHOUCQ **Illustration : Marc BOULAY**

Quel animal fictif ressemble à un petit kangourou, arbore des ailes rigides de chauve-souris et une trompe, et présente un certain penchant pour les boissons alcoolisées ? Les amateurs de bandes dessinées le reconnaîtront : il s'agit du Shingouz, drôle d'espèce qui apparaît dans les aventures de *Valérian et Laureline*, un *space opera* des années 1970 créé par le scénariste Pierre Christin et le dessinateur Jean-Claude Mézières. Cette bande dessinée, véritable perle de la science-fiction française, est en cours d'adaptation au cinéma par Luc Besson.

Dans les aventures de Laureline et Valérian, ces extraterrestres intelligents que sont les Shingouz apparaissent toujours par trois et proviennent d'une planète sans nom dont les conditions sont si austères (climat très pluvieux et ressources quasi nulles) qu'elle les pousse régulièrement à l'exil. Afin de s'intégrer aux différentes civilisations où ils débarquent, ces réfugiés n'ont d'autre choix que d'exercer l'activité dans laquelle ils excellent, à savoir l'achat et la revente d'informations de toutes sortes. Ils apparaissent pour la première fois en 1975 dans un album intitulé « L'Ambassadeur des Ombres ».

Riche et exubérant, l'univers de Valérian et Laureline fait l'objet d'une sorte d'encyclopédie illustrée, *Les Habitants du ciel, atlas cosmique de Valérian et Laureline*, paru en 1991. Le Shingouz n'est qu'un des nombreux représentants de la faune et la flore extraterrestres imaginées par Pierre Christin et Jean-Claude Mézières. Il mérite bien que l'on s'y attarde. Son aspect n'a rien de terrestre, pourtant, à y regarder de plus près, son anatomie, sa biologie, son évolution et son comportement empruntent de nombreux traits bien terrestres.



VALÉRIAN ET LAURELINE rencontrent les Shingouz dans le sixième tome de leurs aventures. Cette espèce extraterrestre présente des caractères rappelant ceux de certains animaux terrestres et des comportements bien humains.

Le pelage de ce petit être haut d'une cinquantaine de centimètres évoque celui des mammifères. Puisqu'il se déplace en posant la plante de ses grands pieds au sol, il est bipède et plantigrade. Son corps est redressé mais sa queue, massive et robuste, traîne souvent au sol. Comme chez les kangourous, cet appendice composé de vertèbres peut aussi servir de support. Les mains du Shingouz ont quatre doigts articulés et griffus, aux pouces opposables. Ses pieds et ses mains sont équipés de petits coussinets qui lui permettent, sur sa planète d'origine, d'évoluer sur un sol rendu humide par les pluies fréquentes (les biologistes parlent d'adaptation). Mais sur les autres planètes qu'il visite, ces coussinets sont aussi très utiles pour palper la monnaie ou toute autre valeur ayant cours légal (les mêmes biologistes parleraient alors d'exaptation !).

En plus de ses quatre membres classiques, le Shingouz est doté de deux ailes rigides qui évoquent celles des chauves-souris. Pour rendre plausible cette paire de membres surnuméraires (rappelons que les mammifères sont des tétrapodes, et non des hexapodes comme les insectes), les auteurs expliquent dans leur encyclopédie,



PERSONNAGE IMAGINAIRE, LE SHINGOUZ viendrait d'une planète lointaine. Les auteurs de la bande dessinée *Valérian et Laureline* se sont probablement inspirés d'animaux terrestres pour imaginer cet être. Par exemple, sa trompe tubulaire n'est pas sans rappeler celle du fourmilier.

dessin du squelette à l'appui, que ces appendices sont soutenus par des excroissances osseuses partant des omoplates. Les ailes du Shingouz, même si elles ressemblent à celles des chauves-souris, ne leur seraient donc pas homologues, d'autant plus que le Shingouz ne vole pas ! Quelle serait alors la fonction de ces mystérieuses excroissances osseuses ? S'agit-il d'accessoires d'apparat, à l'instar des plumes colorées chez les oiseaux ou des bois chez les mammifères, censés attirer et charmer le partenaire pendant la période des amours ? *A priori* non, car le mâle et la femelle arborent tous deux ce type de structure.

Des capteurs solaires sur le dos

Notre hypothèse est que les « ailes » du Shingouz contribuent à la thermorégulation (gestion de la température interne du corps). En augmentant la surface de contact du corps avec le milieu extérieur, elles favorisent les échanges thermiques, à la façon des oreilles qui permettent aux éléphants d'évacuer leur chaleur interne. Étant donné le climat de la planète d'origine du Shingouz, la fonction inverse est plutôt à envisager : les « ailes » fonctionneraient comme des capteurs solaires absorbant le moindre photon pour maintenir une température interne constante. De telles structures seraient alors analogues aux grandes plaques osseuses dressées sur le dos des stégosaures (dinosaures herbivores du Jurassique), ou aux os ornementés des crocodiles ou de leurs cousins stégocéphales – ces os présentent de nombreux sillons et crêtes qui augmentent la surface de contact du corps avec l'extérieur. Le Shingouz, bien connu dans l'univers de Valérian pour être un cupide marchand d'informations, serait donc aussi un paisible « écolo » muni de capteurs solaires sur le dos !

En parlant de réputation, qu'en est-il de son alcoolisme chronique ? L'encyclopédie des *Habitants du ciel* nous renseigne aussi sur ce point croustillant : la seule source énergétique produite sur la planète d'origine du Shingouz est une sorte de fluide minéral nommé glingue, semblable aux fluides hydrothermaux très riches en silice que l'on trouve sur Terre – sauf que le glingue est très riche en alcool ! Le Shingouz s'en délecte et l'assimile sans difficulté grâce à son foie très volumineux et son triple estomac. Cet organe rappelle l'estomac multiple des ruminants qui digèrent plusieurs fois leur nourriture.

Le Shingouz use-t-il de la même technique pour mieux digérer l'alcool ? La question reste ouverte. L'alcool étant plus soluble dans l'eau que dans les graisses, la concentration d'alcool dans le sang dépend de la quantité d'eau contenue dans le corps. La tolérance du Shingouz à l'alcool suggère donc que son corps contient une forte quantité d'eau et peu de graisse. Ce penchant n'est pas sans rappeler celui d'autres animaux, tels les vervets, petits singes d'origine africaine dont certaines populations caribéennes se délectent de jus de canne fermenté et présentent une très bonne tolérance à l'éthanol.

Et pour boire tout cet alcool, le Shingouz se sert d'une trompe tubulaire, résultat de la fusion de la mâchoire inférieure et de la mâchoire supérieure. Cette trompe est percée de deux orifices, l'un pour la respiration, l'autre pour l'alimentation. Chez les mammifères bien réels, cet hyperallongement de la partie préorbitaire du crâne nommé longirostrie s'observe chez les tatous (la famille des *Dasypodidae*), les pangolins (*Manidae*) et les fourmiliers (*Myrmecophagidae*).

Cette longirostrie semble liée à une réduction, voire une perte, de la denture : tatous, pangolins et fourmiliers étaient d'ailleurs rangés autrefois dans un groupe artificiel nommé édentés, alors qu'ils n'avaient pas tous complètement perdu leurs dents. Les paléontologues se sont aperçus que ce phénomène était en fait apparu plusieurs fois au cours de l'évolution des mammifères. Est-ce aussi le cas chez le Shingouz ? Quoi qu'il en soit, cet extraterrestre arbore tantôt des caractères habilement empruntés à des animaux réels, tantôt des traits qui lui sont bien propres : une mosaïque qui le rend d'autant plus crédible et attachant ! ■

Jean-Sébastien STEYER est paléontologue au CNRS-MNHN, à Paris. Roland LEHOUCQ est astrophysicien au CEA, à Saclay. Marc BOULAY est sculpteur numérique.

ART & SCIENCE

Le pharaon et les extraterrestres

La lame d'une dague retrouvée à côté de la momie de Toutânkhamon a été fabriquée à partir du fer d'une météorite venue des confins du Système solaire. Un matériau idéal pour le fils du dieu Soleil...

Loïc MANGIN

Vers 1338 avant notre ère, le roi Akhénaton meurt dans des circonstances mystérieuses. Après une brève régence de Smenkhkarê et de Ânkh-Khéperourê, c'est son fils, âgé de seulement 9 ans, qui lui succède : Toutânkhaton. Il sera plus connu sous le nom de Toutânkhamon, qu'il prendra après l'abandon du culte du dieu unique Aton. Le jeune pharaon monte sur le trône de la Haute et Basse-Égypte et devient alors le fils du dieu Amon, et de Rê, le dieu solaire. Il sera l'incarnation de notre étoile moins d'une dizaine d'années. Mais les rois n'étaient pas les seuls échantillons du Système solaire à être appréciés et vénérés par le peuple égyptien à cette époque. C'était aussi le cas du fer...

De fait, jusqu'au Ier millénaire avant notre ère, le fer était rare dans la vallée du Nil, car les Égyptiens ne savaient pas l'extraire du minerai le contenant (il faut le porter à plus de 1 000 °C) : c'était l'âge du Bronze. Le fer était alors précieux – plus que l'or – et réservé à une élite sous la forme d'objets ornementaux et rituels. D'où provenait le métal ? Du ciel, comme les pharaons !

C'est ce qu'ont montré Daniela Comelli, physicienne à l'École polytechnique de Milan, et ses collègues. Ces chercheurs ont analysé un bel objet, la dague de Toutânkhamon *(page ci-contre, c)* trouvée dans son tombeau mis au jour en 1922 par l'archéologue Howard Carter dans la vallée des Rois, près de Louxor.

Les bandelettes qui emmaillotaient la momie de Toutânkhamon cachaient deux poignards. La lame de l'un, près de l'abdomen, était en or, celle de l'autre, près du flanc droit *(indiqué par la flèche sur la photo b)*, en fer. Cette dernière, non oxydée, semble homogène. La poignée de l'arme est en or fin, décoré en cloisonné, et arbore à son extrémité un pommeau de cristal de roche. Le fourreau, également en or, est orné d'un motif floral d'un côté et de plumes de l'autre, une tête de chacal ornant la pointe.

Les physiciens italiens ont reçu l'autorisation d'examiner la lame de fer à l'aide d'une technique non invasive, la spectrométrie de fluorescence par rayons X, pour en analyser la composition. Résultat : le métal est constitué, outre de fer, d'environ 10 % de nickel (Ni) et quelque 0,5 % de cobalt (Co). De telles proportions ne se trouvent pas dans le fer d'origine terrestre, plus pauvre en nickel. En outre, le rapport Ni/Co correspond à celui que l'on trouve dans les chondrites ferreuses, des météorites non différenciées dont le matériau s'est formé en même temps que le Système solaire.

Les Égyptiens connaissaient peut-être l'origine céleste du fer qu'ils utilisaient – avec 2 000 ans d'avance sur les Occidentaux

L'équipe italienne a cherché à en savoir plus sur la météorite et a consulté la banque de données MetBase qui recense toutes les informations disponibles sur les météorites connues. La composition de la lame correspondrait à celle de la météorite Kharga, découverte en Égypte en 2000 à Marsa Matruh, une ville portuaire à 240 kilomètres à l'ouest d'Alexandrie.

Les orfèvres qui ont fabriqué la dague de Toutânkhamon ne disposaient cependant pas de tous les fragments tombés du ciel. Et ils n'étaient d'ailleurs peut-être pas égyptiens. En effet, les archives royales d'Amarna révèlent que Tushratta, souverain du Mitanni, un royaume voisin de l'Égypte (en Syrie actuelle), a envoyé à Amenhotep III (le grand-père de Toutânkhamon selon certaines généalogies) un bracelet de fer ainsi que des poignards dotés de lames de ce même matériau. Le couteau analysé faisait-il partie de ces présents diplomatiques ?

Une question plus profonde est de savoir si les Égyptiens savaient d'où venait ce fer. Or à l'époque de Toutânkhamon, on observe une évolution dans les hiéroglyphes. À côté de celui qui signifiait « minerai, fer, métal » apparaît un autre, composite, que l'on pourrait traduire par « fer tombé du ciel » et qui est utilisé à partir de la XIXe dynastie (au début du XIIIe siècle avant notre ère) pour décrire tout type de fer. Peut-on en déduire que les Égyptiens connaissaient l'origine céleste de ce métal ? Dans l'affirmative, ils avaient alors deux millénaires d'avance sur les Occidentaux. ■

D. Comelli *et al.*, **The meteoritic origin of Tutankhamun's iron dagger blade**, *Meteoritics & Planetary Science*, en ligne, 20 mai 2016.



a

b

c

TOUTÂNKHAMON, dont on connaît le célèbre masque mortuaire en or massif *(a)*, avait emporté dans la tombe *(b)* deux poignards, dont un avait une lame en fer *(c, l'arme fait 34 centimètres de long)*. Ce métal provient d'une météorite.

D. Comelli et al.

IDÉES DE PHYSIQUE

Superballes, superrebondissements

Les rebonds déroutants des « superballes » sont, en théorie, prévus. Mais en pratique, ils doivent beaucoup à un heureux concours de circonstances.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Pour décrire la réflexion d'un rayon lumineux sur un miroir ou d'une particule sur une surface parfaite, le physicien déclare : « L'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence. » Pourtant, jouer avec une superballe nous convaincrait presque du contraire ! Effets rétrogrades, rebonds périodiques... : autant d'effets saisissants qu'une étude théorique prévoit dans des conditions idéales, desquelles s'approchent justement les superballes. Les performances de ces objets sont dues à leur matériau, certes, mais aussi, comme nous allons le découvrir, à une coïncidence favorable entre deux différents modes de vibration.

Rebonds d'une balle idéale

Commençons par décrire le rebond le plus simple. Lâchons, sans lui donner d'effet, une balle supposée idéale. Lors de sa chute, l'énergie potentielle de pesanteur est convertie en énergie cinétique. Au contact du sol, la balle se comprime et, au moment où elle s'immobilise complètement, son énergie se retrouve intégralement stockée sous forme d'énergie potentielle élastique. La balle se détend alors, retrouve sa forme initiale, rebondit avec une vitesse verticale opposée à la vitesse incidente et remonte jusqu'à sa hauteur initiale.

Évidemment, tout cela suppose l'absence de dissipation d'énergie, ce dont on peut douter : une balle réelle ne rebondit pas si haut. Là réside la première des qualités des superballes. Composées de Zectron, un caoutchouc synthétique breveté par le chimiste américain Norman Stingley en 1964, leur coefficient de restitution – le rapport vitesse de rebond/vitesse incidente – dépasse les 90 %, ce qui les fait remonter à plus de 80 % de la hauteur de chute.

Qu'advient-il lorsqu'on lance la balle avec une incidence oblique, en lui imprimant ou non une rotation sur elle-même autour d'un axe horizontal ? Sans dissipation d'énergie et en supposant que le contact au sol est quasi ponctuel (donc aucun couple de forces ne s'exerce lors de l'impact), on trouve que la hauteur de rebond dépend uniquement de la hauteur de chute et de la vitesse initiale selon la verticale. Cela signifie qu'il y a indépendance entre les mouvements horizontaux et les mouvements verticaux.

En revanche, la rotation et le mouvement horizontal sont étroitement liés. On note par exemple que la vitesse horizontale du point de contact (laquelle résulte de la vitesse de translation de la balle et de sa rotation propre) s'inverse lors de l'impact au sol, comme s'il y avait un choc contre un mur vertical.

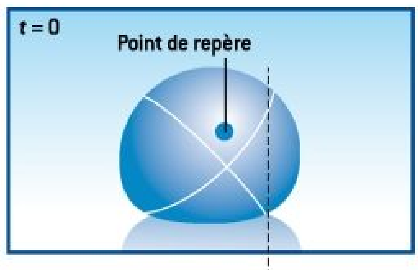
Les conséquences de cette inversion du sens de rotation de la balle sont multiples. Il peut notamment y avoir périodicité du mouvement puisque, après deux rebonds de la balle sur le sol, on retrouve la même vitesse horizontale et la même rotation. Ainsi, quand on lâche une balle en rotation, elle acquiert au premier rebond une vitesse horizontale et se met à tourner en sens inverse. En revanche, le second rebond se

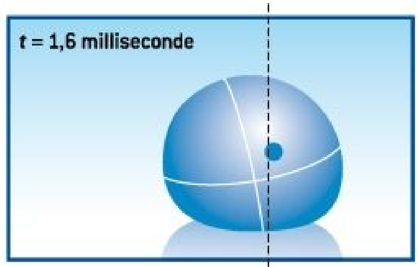


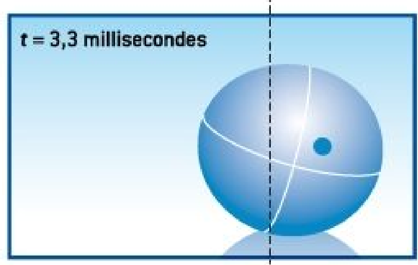


Dessins de Bruno Vacaro

LES REBONDS CONTRE-INTUITIFS D'UNE SUPERBALLE. Les changements surprenants de direction et de sens de rotation s'expliquent par le fait que la vitesse horizontale du point d'impact de la balle s'inverse au moment du choc, et ce en gardant presque la même amplitude, comme si elle était réfléchie par un mur vertical.







AU COURS DE L'IMPACT, la balle est comprimée verticalement. Et si l'incidence est oblique ou si la balle est en rotation, elle glisse brièvement et subit un cisaillement horizontal, d'où une déformation asymétrique.

fait avec la même rotation qu'au lâcher, toujours selon la verticale.

Et si on lance la balle en avant, avec une rotation dont le sens est tel que la vitesse de translation et celle de rotation s'additionnent au point d'impact ? La balle revient alors en tournant dans l'autre sens, puis repart vers l'avant, etc. *(voir la figure page précédente)*.

Avec deux plans, par exemple le sol et la face inférieure d'une table, c'est encore plus étonnant. Quand on lance la balle à 45 degrés sous une table, elle rebondit au sol et acquiert une rotation qui, lorsqu'elle remonte frapper le dessous de la table, la fait revenir vers l'arrière – si bien qu'après un troisième rebond, la balle revient vers les mains du lanceur.

Glissade et frottement

En pratique, avec une superballe, on observe de tels comportements prévus par la théorie. Cependant, la très bonne élasticité de cet objet n'explique pas tout.

Nos hypothèses d'une situation idéale sont en effet loin d'être vérifiées. D'abord, la balle glisse très brièvement sur le sol, jusqu'à ce que le frottement immobilise le point de contact (le frottement augmente fortement à mesure que la balle se comprime et décélère verticalement).

Ces frottements sur la superballe en mouvement dissipent de l'énergie (ils chauffent le sol et la balle !). On constate que le coefficient de restitution horizontale, rapport entre les vitesses horizontales de la balle après et avant l'impact, est inférieur au coefficient de restitution verticale : d'un peu plus de 0,9, on descend à un peu moins de 0,8. L'écart est, somme toute, modeste.

Avec une balle pleine en caoutchouc, le coefficient mesuré est plutôt de l'ordre de 0,5. Et avec des balles en matériau plus dur, qui glissent davantage sur un sol lisse, par exemple une balle de golf ou une bille d'acier, le coefficient de restitution est encore plus faible.

Jusqu'à très récemment, on expliquait ces coefficients de restitution horizontale exclusivement en termes de coefficients de frottement : plus ce dernier est élevé, plus la balle accroche, et moins elle glisse, meilleur est le coefficient de restitution horizontale. Toutefois, pour une balle de caoutchouc creuse, qui présente donc le même coefficient de frottement que la balle pleine, le coefficient de restitution mesuré est égal à – 0,1, c'est-à-dire bien plus faible et négatif ! Comment expliquer ce paradoxe ?

Il faut détailler davantage la phase d'impact. La balle se déforme notablement : elle est comprimée par la réaction verticale du sol, mais aussi cisaillée par la force de frottement, horizontale *(voir la figure à gauche)*. Ces déformations peuvent être élastiques et on peut alors assimiler les vibrations qui en résultent à celles d'un oscillateur harmonique, c'est-à-dire un ressort

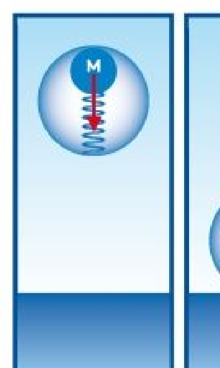
■ LES AUTEURS

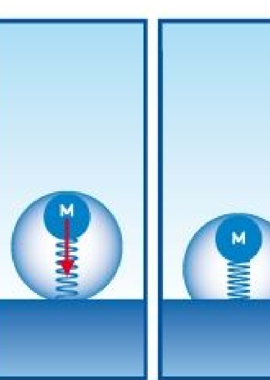


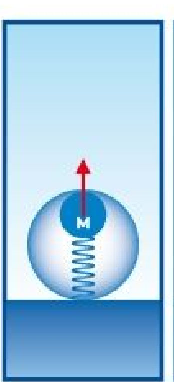


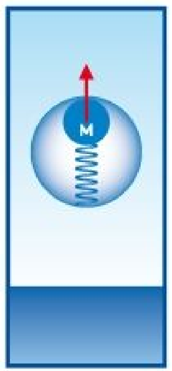
Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK sont professeurs de physique à l'université Pierre-et-Marie-Curie, à Paris. Leur blog : www.scilogs.fr/idees-de-physique











ON PEUT ASSIMILER LA BALLE et son élasticité à une masse *M* attachée à un ressort. Au moment de l'impact sur la surface, le ressort se comprime puis se détend, d'où le rebond. En cas d'impact oblique ou si la balle est en rotation, le cisaillement produit est assimilable à la compression d'un ressort horizontal. Dans une superballe, les périodes d'oscillation des deux ressorts sont voisines. La restitution de l'énergie cinétique au rebond est alors optimale.

attaché à une masse qui ne s'écarte pas trop de la position d'équilibre.

Au cours du choc, l'oscillateur harmonique équivalent aux déformations verticales vibre d'une demi-période (balle incidente non déformée à pleine vitesse, compression maximale et arrêt, rebond à pleine vitesse, *voir la figure page précédente, en bas*) et, idéalement, la balle retrouve l'intégralité de son énergie cinétique « verticale » incidente.

Dans le même temps, l'oscillateur harmonique équivalent aux déformations horizontales vibre... mais pas forcément avec la même période. Par conséquent, au moment du rebond, l'état de déformation de ce ressort peut être quelconque et une partie de l'énergie cinétique « horizontale » incidente peut rester stockée sous forme élastique. Relâchée d'un coup au décollage, cette énergie provoquera des vibrations de la balle en vol.

Ainsi, en règle générale, l'origine des pertes d'énergie pour le mouvement horizontal est double : frottement et transfert partiel d'énergie sous forme élastique. Il se trouve que dans une superballe, les deux périodes de vibration (horizontale et verticale) coïncident, par un heureux hasard. Il s'ensuit que la superballe rebondit sans emporter d'énergie élastique.

Pour une superballe creuse ou un ballon de basket, pourtant très élastiques, les deux périodes de vibration diffèrent, ce qui fait qu'une partie de l'énergie cinétique reste stockée sous forme élastique lors du rebond. Il en résulte un coefficient de restitution horizontale réduit, si bien qu'il devient très difficile d'obtenir tous les étonnants rebonds de la superballe. Heureusement, en un sens : un superballon de basket serait probablement dangereux ! ■

BIBLIOGRAPHIE

R. Cross, **Impact behavior of a superball,** *American Journal of Physics*, vol. 83, pp. 238-248, 2015.

R. Cross, **Behaviour of a bouncing ball,** *Physics Education*, vol. 50, pp. 335-341, 2015.

R. L. Garwin, **Kinematics of an ultraelastic rough ball,** *American Journal of Physics*, vol. 37, pp. 88-92, 1969.

QUESTION AUX EXPERTS

La radioactivité naturelle est-elle dangereuse ?

Non, sauf en certains endroits ou si des activités humaines ont conduit à sa concentration.

Jean-François LECOMTE


Mine d'uranium en Australie
© John Carnemolla/Shutterstock.com

La radioactivité naturelle n'est ni plus ni moins dangereuse que la radioactivité artificielle. Comme son nom l'indique, elle fait partie de notre environnement depuis toujours. Les animaux et les végétaux ont appris à vivre avec elle, du moins quand elle n'est pas trop intense.

D'où vient-elle ? Des radionucléides naturels. On nomme ainsi les atomes aux noyaux instables présents dans la nature. Ces radionucléides se désintègrent spontanément à des instants aléatoires, chacun étant caractérisé par une « période radioactive », à savoir le temps au bout duquel la moitié des atomes radioactifs initialement présents se sont désintégrés.

Pour l'essentiel, les radionucléides présents dans la nature sont les produits directs ou indirects de la désintégration de trois radionucléides primordiaux, c'est-à-dire présents lors de la formation de la Terre, parmi la vingtaine qui subsistent : l'uranium 238, le thorium 232 et l'uranium 235. En se désintégrant, ces radionucléides primordiaux émettent des particules – c'est-à-dire de la radioactivité – et se transforment en atomes aux noyaux plus légers : les radionucléides secondaires. Ces derniers se désintègrent à leur tour et ainsi de suite jusqu'à formation d'atomes stables. Les périodes radioactives des radionucléides secondaires sont nettement plus courtes que celles des radionucléides primordiaux, mais il arrive qu'elles soient longues, telle celle du radium 226, qui est de 1 620 ans.

La radioactivité naturelle est présente dans les sols à des degrés variables, qui culminent dans les terrains granitiques, nombreux en France dans le Massif central, en Franche-Comté, en Bretagne ou en Corse. Dans la plupart des cas, elle n'est pas dangereuse. Mais il arrive que les activités minières la concentrent, en particulier quand on extrait de l'uranium. Il est alors nécessaire d'y protéger les mineurs et tous les travailleurs manipulant les substances extraites puis retravaillées. Des mesures sont aussi prises pour protéger la population des expositions liées aux résidus miniers de sites actifs ou déjà fermés.

L'exposition au radon, un risque potentiel

Un autre risque lié à la radioactivité naturelle à prendre au sérieux est le radon, un gaz qui émane du sol et qui est donc susceptible de se retrouver piégé dans les bâtiments dont l'air intérieur est mal renouvelé. Le radon inhalé est exhalé, mais ses radionucléides secondaires métalliques se collent aux poussières ou sur les parois respiratoires jusqu'aux poumons. Le radon gazeux et ses formes solides secondaires constituent la principale source d'exposition de la population à la radioactivité naturelle. L'inhalation prolongée du gaz radon peut provoquer des cancers du poumon, d'où l'importance de surveiller ses concentrations et d'intervenir lorsqu'elles sont élevées.

En France, la radioactivité due au radon varie beaucoup selon les endroits, entre quelques dizaines et plusieurs milliers de becquerels par mètre cube, sachant qu'il est recommandé de ne pas dépasser 300 becquerels par mètre cube.

À partir du sol, les radionucléides se propagent aussi dans les chaînes alimentaires terrestres, mais en général sans s'accumuler dans le corps humain. Ils se concentrent davantage dans les chaînes alimentaires marines. On retrouve ainsi dans les algues, les crustacés, les mollusques et les poissons des concentrations en radionucléides qui varient selon l'époque de l'année. Toutefois, même si l'exposition par cette voie peut être non négligeable, elle n'est jamais préoccupante.

Une autre forme de radioactivité naturelle est le rayonnement cosmique. Sa première composante, des ions ultraénergétiques, est due aux rayonnements provenant de notre galaxie ou d'autres. La seconde, surtout des protons d'énergie plus faible, provient du Soleil et fluctue avec les éruptions solaires. Au niveau du sol, le rayonnement cosmique est inoffensif, mais les personnes qui prennent souvent l'avion ou font des missions spatiales augmentent notablement leur exposition. C'est pourquoi l'exposition des personnels navigants des compagnies aériennes est contrôlée. Du reste, il existe des outils en ligne permettant à chacun de calculer son exposition après un vol. ■

Jean-François LECOMTE est expert en radioprotection à l'IRSN (Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire).

SCIENCE & GASTRONOMIE

Des soufflés sans œufs

Pour obtenir un soufflé, il faut faire mousser un liquide, puis le solidifier. Or on peut mettre en œuvre ce mécanisme avec d'autres ingrédients que des œufs.

Hervé THIS





Intermédiaires entre la crêpe, plate, et le ballon qui éclate, les soufflés sont des systèmes fragiles. Comment se fait le gonflement désiré ? Les bulles d'air se dilatent lors de la cuisson, mais peu : le mécanisme essentiel est l'évaporation de l'eau. Pour un soufflé de 100 grammes, qui perd 10 grammes lors d'une cuisson de 40 minutes à 180 °C, le volume de gaz produit est de l'ordre de 10 litres. Cette vapeur, formée à la base du soufflé, pousse les couches vers le haut, tandis que l'œuf coagule et fige la structure alvéolée formée.

La cuisine dit que « l'œuf fait souffler », mais où cette vertu soufflante se nicherait-elle dans les œufs ? En fait, il est possible de généraliser le principe du soufflé, afin d'en inventer des inédits.

La combinaison d'un foisonnement et d'une fixation offre de multiples possibilités. Pour commencer, les mécanismes de foisonnement sont de divers types. La production de bulles de vapeur par un chauffage approprié (par le fond, à plus de 100 °C) en est un, important en cuisine, la plupart des aliments étant composés d'eau. Toutefois, il y en a d'autres. Par exemple, on peut injecter des bulles par un filtre en verre fritté, qui ferait la base d'un ramequin amélioré, ou bien à l'aide d'un tuyau placé dans la préparation et alimenté par une pompe.

On peut aussi former les bulles non plus par un changement d'état ou par injection directe, mais par des mécanismes chimiques ou biologiques. Les poudres levantes, par exemple, libèrent du dioxyde de carbone par réaction entre des composés minéraux : les combinaisons sont nombreuses, du simple mélange d'acide tartrique et de bicarbonate, aux mélanges plus évolués, qui ne sont pas déstabilisés par la seule présence de l'eau mais doivent en outre être chauffés, tel le mélange de bicarbonate de sodium et de pyrophosphate acide de sodium.

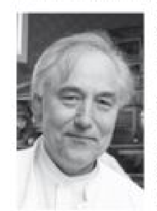
Pour les mécanismes biologiques, les levures ne sont pas les seuls microorganismes producteurs de dioxyde de carbone ; d'autres microorganismes font des fermentations, telles les bactéries propioniques, qui font les trous de certains fromages. Bien sûr, les fermentations risquent d'être longues, mais qui a dit qu'un soufflé doit être rapidement produit ? L'écueil d'un foisonnement lent est la possible déstabilisation d'une mousse qui serait trop liquide, les bulles venant crever à la surface sans provoquer le foisonnement attendu. Pour y remédier, le foisonnement doit porter sur un liquide plus visqueux.

Les bulles étant faites, il faut stabiliser la mousse, car on conçoit qu'un soufflé soit plus qu'une simple mousse, sans toutefois verser dans le biscuit ou le gâteau. La différence entre ces divers systèmes est que le volume d'un gâteau varie peu, contrairement à celui d'un soufflé.

Cela étant, comment « fixer » la structure foisonnée ? Dans les soufflés classiques, ce sont les protéines de l'œuf (soit du blanc, soit du jaune) qui coagulent. On trouve d'autres protéines coagulantes dans des végétaux (pois, lentilles...) ou dans des tissus animaux (viandes, poissons, crustacés). Ces protéines engendrent des « gels chimiques », où les forces entre protéines sont des liaisons covalentes, non réversibles. D'autres réseaux solides se forment à partir de forces différentes. Par exemple, l'ajout de présure à du lait entraîne une coagulation acide, ou le refroidissement permet de gélifier de la gélatine. Dans tous les cas, il faut d'abord provoquer le foisonnement de la structure avant de la figer.

Surtout, il faut donner du goût à tous ces soufflés ! Un aliment se caractérise par une consistance, une forme, une couleur, une odeur, une saveur, des sensations « trigéminales » (frais, piquant...), etc. Les bulles, quelles qu'elles soient, viendront dans un liquide, lequel peut être une simple solution, auquel cas les molécules hydrosolubles seront vraisemblablement sapides, ou bien un système polyphasique avec, par exemple, des gouttes d'huile dispersées dans une phase aqueuse, ce qui permet d'introduire des composés odorants, mais aussi avec des particules solides (cristaux de sucre, de sel, d'acide citrique, d'acide tartrique, de monoglutamate de sodium) ; enfin, le gaz utilisé pour le foisonnement peut être parfumé.

Le petit monde des soufflés gagne à se généraliser ! ■



Hervé THIS, physicochimiste, est directeur du Centre international de gastronomie moléculaire AgroParisTech-Inra et directeur scientifique de la fondation Science & culture alimentaire (Académie des sciences).



Retrouvez la rubrique Science & gastronomie sur www.pourlascience.fr

OPEN INNOVATION



Register online before June 30th, 2016

www.cosmetic-360.com

+33 (0)2 37 211 211 - contact@cosmetic-360.com

■ PHYSIQUE

Le Mystère du monde quantique

Th. Damour et M. Burniat

Dargaud, 2016
(160 pages, 19,99 euros).

Un dessinateur et un astrophysicien de renom collaborent ici afin de raconter en images une histoire de physique. Les lecteurs sont conviés à un voyage en bandes dessinées, où ils suivront le héros Bob à la rencontre de plusieurs des grands physiciens du XXe siècle, qui ont contribué à l'élaboration de ce pan majeur de la physique qu'est la théorie quantique.



Cette théorie physique explique en effet une très vaste gamme de phénomènes physiques – depuis la structure des atomes à celle de certaines étoiles, en passant notamment par les propriétés électroniques des solides –, mais elle est notoirement difficile à exposer, tant ses fondements et certaines de ses prédictions sont contraires à l'intuition. Selon cette théorie, un chat peut par exemple être placé dans un état où il est « à la fois » mort et vivant (toute la difficulté réside dans la signification exacte de ce « à la fois »). Pour faciliter la plongée du lecteur dans les bizarreries du monde quantique, les auteurs ont eu la brillante idée de placer leur histoire dans une trame onirique, où la progression du récit, frôlant parfois l'absurde, évoque irrésistiblement les aventures du Philémon de Fred. Cette mise à l'écart de la logique n'est qu'apparente, et c'est en fait une construction fidèle au développement historique du domaine qui est présentée.

Voilà pourquoi cet essai de vulgarisation de la théorie quantique m'a paru réussi, tant sur le plan pédagogique que visuel ou narratif. L'écriture à plusieurs niveaux fait que les lecteurs familiers de la physique quantique sont amusés de repérer des clins d'œil (serions-nous grillés par les rayons gamma émis par les braises d'un feu de camp si la constante de Planck était bien plus petite ?). Ceux qui ne le sont pas pourront appréhender la bizarrerie du monde quantique en s'amusant. Tous seront sensibles au bel épilogue qui ancre le sujet du livre dans un passionnant questionnement philosophique.

Richard Taillet
Université de Savoie-Mont-Blanc

■ ZOOLOGIE

Comme les bêtes

Menno Schilthuizen

Flammarion, 2016
(320 pages, 21,50 euros).

Tout, tout, vous saurez tout sur le zizi des araignées… et d'ailleurs aussi sur les grenades… à sperme, sur les gonodopes, les épigynes et autres édéages en action dans les ballets amoureux du règne animal…

La sexualité des petites bêtes comme des grandes est un sujet passionnant, que l'auteur nous décrypte à coups d'anecdotes scientifiques. Saviez-vous que les clitoris des taupes et des hyènes sont surdimensionnés et capables d'érection ? Que l'orgasme féminin n'est pas propre à notre espèce et augmenterait les chances des spermatozoïdes d'atteindre leur but ? Que plus c'est gros, mieux c'est, mais plus c'est court, plus c'est sûr : essayez donc, encombré par un pénis qui fait deux fois votre taille, d'échapper à un prédateur !

Phénomène bien connu, la sélection naturelle, sous la pression de facteurs extérieurs, pousse les



espèces vers l'adaptation optimale des individus qui les composent. Mais qu'en est-il de la sélection sexuelle ? Elle ne peut tendre à un optimum unique puisqu'elle oppose, au sein d'une même espèce, deux sexes qui essaient de s'adapter l'un à l'autre. Il est stupéfiant de découvrir les stratégies développées pour déterminer qui aura le dernier mot en transmettant ses gènes. Et cela ne porte guère à parler de coopération entre les sexes… dans le monde animal du moins !

Les femelles sont en effet loin d'être des machines reproductives passives, mais plutôt les résultats d'une longue évolution, que la sélection a optimisés pour servir leurs propres intérêts et ceux de leur progéniture. Elles ont plus d'un tour dans leur sac pour faire leur « choix secret » et décider quels spermatozoïdes auront accès à leurs ovules : s'accoupler « à sec » pour se défiler au moment suprême, rejeter le sperme, se servir de valvules et verrous intérieurs pour tenir la semence indésirable à l'écart ou encore stocker le sperme pour décider plus tard de l'utiliser ou non. Même quand l'ovule est fécondé, elles peuvent encore en dernier ressort empêcher l'embryon d'arriver à terme si un nouveau mâle apparaît, qui pourrait être infanticide.

Pour les mâles, les calculs inconscients des femelles ne sont pas de bon augure ! Leur intérêt biologique à eux est que leur sperme féconde autant d'ovules que possible. Alors, ils profitent de la panoplie de moyens que l'évolution leur a offerte pour parvenir à leur fin de fécondation : amadouer la femelle, la contraindre, la berner… Pour ce faire, ils déploient divers atouts et stratagèmes : parade nuptiale, mutation du pénis qui se prolonge et permet d'évacuer le sperme des rivaux, insémination traumatique, bouchon copulatoire pour limiter l'efficacité des suivants chez les femelles aux mœurs légères, substances chimiques dans la semence à effet manipulateur et antiaphrodisiaque pour anesthésier les pulsions sexuelles de la femelle envers ses compétiteurs…

Fanélie Wanert
Centre de primatologie de l'université de Strasbourg

■ BIOPHYSIQUE

Comment fait le gecko pour marcher au plafond ?

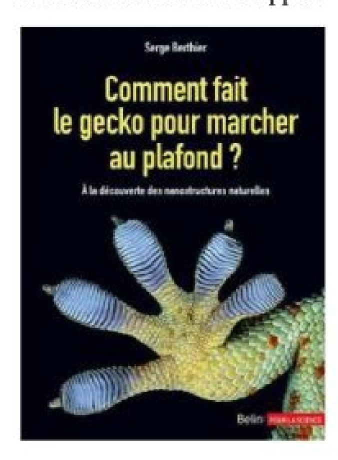
Serge Berthier

Belin/Pour la Science, 2016
(240 pages, 26 euros).

L'évolution et la diversité du vivant sont ici scrutées par l'œil du physicien sous le grossissement du microscope électronique. En découvrant les

ultrastructures nanométriques, l'auteur, jouant avec les échelles, nous plonge dans un monde d'images belles et étonnantes par l'originalité des solutions adaptatives qu'elles révèlent.

Les explications physiques ou chimiques nécessaires sont données dans un esprit naturaliste, qui fait apparaître l'efficacité des nanostructures développées



au cours de millions d'années d'évolution, à l'interface entre les organismes et leurs milieux. À ce propos, le livre est structuré en quatre milieux, ou plutôt en quatre éléments : l'air, l'eau, la terre et le feu. Chaque partie présente des structures souvent multifonctionnelles ; une cinquième partie est consacrée aux structures dont les fonctions sont encore inconnues.

Les adaptations dans l'air concernent particulièrement la lumière et la couleur, notamment la création de tons structurels, ce qui souligne à quel point les bleus et verts pigmentaires sont rares dans la nature. On comprendra l'unicité du bleu Morpho, l'invisibilité ou encore comment focaliser la lumière en eau profonde. La superhydrophobie, les gouttes « fakirs », la façon dont les insectes évitent la surchauffe létale ou celle dont le gecko adhère à une surface, sont autant de phénomènes clairement interprétés.

Et puis ces mystérieuses structures telles l'empilement un peu désordonné de bactéries marines et leur iridescence variable entretiennent la curiosité. Les solutions que la nature a trouvées inspirent aussi des applications : recueillir la rosée des régions désertiques comme le fait un coléoptère, créer des détecteurs futuristes de molécules...

Caroline Lerat-Lequertier
Lycée La Fontaine, Paris

■ **SCIENCE ET SOCIÉTÉ**

De la pénicilline à la génomique

François Gros
Odile Jacob, 2016
(192 pages, 22,90 euros).

Avec un demi-siècle de recul, François Gros fait le bilan de sa carrière exceptionnelle. S'attachant à décrire la richesse de ses rencontres avec des chercheurs de tous horizons (à l'institut Pasteur, aux États-Unis, à l'Institut de biologie physicochimique, au Collège de France, en Afrique avec la création du Coped ou à l'Académie des sciences), il en souligne l'influence sur ses recherches et ses engagements. Leçon d'humanité et de modestie, puisque la principale leçon qu'il en tire est que, sans les autres, on ne peut ni s'épanouir ni progresser, tandis que toute rencontre nous conditionne.

Or nous devons beaucoup à François Gros, notamment ses découvertes décisives de l'ARN messager, du rôle des ARN de transfert dans son décodage et des mécanismes et étapes de la transcription du génome…

À chaque étape de sa vie de chercheur, il rappelle le rôle qu'ont joué les Michel Macheboeuf, André Lwoff, Jacques Monod, François Jacob, Georges Cohen, Walter Gilbert, Marianne Grunberg-Manago, Jean Hamburger… Ils sont chercheurs chevronnés, futurs Nobel, mais aussi stagiaires ou politiques, et les nommer tous est impossible. Chacun a contribué à l'épopée scientifique de François Gros.

Cet ouvrage contient aussi une réflexion sur la portée éthique et

FRANÇOIS GROS
DE LA PÉNICILLINE À LA GÉNOMIQUE
PORTRAITS ET RENCONTRES





sociale de la science, sur le regard porté par la société civile sur la recherche en biologie fondamentale et sur ses applications possibles auprès des malades. À la suite des travaux menés dans son laboratoire sur la génétique de la myogenèse, la rencontre avec Bernard Barataud, le président de l'Association française contre les myopathies (AFM), l'a naturellement conduit, grâce à ses fonctions de conseiller scientifique à Matignon, à favoriser la création de l'AFM puis du Téléthon et à lancer la Génopole à Évry.

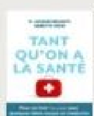
Bernard Schmitt
CERNh, Lorient





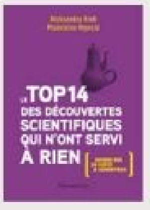
L'Art érotique antique
Cyril Dumas
Book-e-book, 2016
(72 pages, 11 euros).

Dans ce petit livre (électronique ou en papier), l'auteur veut nous avertir sur les idées fausses qui courent sur les représentations sexuelles et érotiques de l'Antiquité romaine. Selon lui, l'apparence sexuelle ou érotique des nombreuses représentations grecques et romaines induit en erreur : les représentations priapiques (phalliques) sont avant tout des porte-bonheur sans aucune connotation sexuelle, et les représentations obscènes avant tout des attaques moqueuses contre la dépravation.



Tant qu'on a la santé
J. Belghiti et A. Vezin
Fayard, 2016
(300 pages, 19 euros).

Saviez-vous que... le pamplemousse est déconseillé avec les médicaments, que l'on peut greffer sur l'homme des organes animaux, que le port du voile par des musulmanes en Scandinavie y a entraîné une maladie grave par carence vitaminique, que les chaussures de course ne sont pas très bonnes pour le corps ? Avec l'aide d'une journaliste, un grand médecin membre du collège de la Haute autorité de santé met plus de 200 idées reçues sur la santé à l'épreuve des données de la recherche. Un livre passionnant !



Le top 14 des découvertes scientifiques qui n'ont servi à rien
A. Kroh et M. Veyssié
Flammarion, 2016
(192 pages, 17 euros).

Guérison quantique, toucher thérapeutique, fusion froide, mémoire de l'eau... : les histoires de scientifiques qui, en toute bonne foi, ont mené des recherches *a priori* absurdes et se sont autopersuadés d'avoir des résultats sont cruelles, mais instructives. Les histoires de ceux qui ont mené des recherches sur des phénomènes *a priori* sans intérêt et obtenu des résultats ingénieux sont amusantes et tout aussi instructives. Deux physiciennes les racontent avec une drôlerie, une précision et une distance scientifique merveilleuses.

INSISTANCE HABILE OU MALADROITE

Lorsqu'un orateur veut insister sur quelque point, il s'y prend en général en le répétant sur tous les tons. Mais il risque de passer pour pénible. Il lasse. Il retient mieux l'attention, convainc plus, s'il varie les formulations et les angles d'attaque, s'il expose avec doigté sa thèse sous des aspects divers.

« Insister lourdement » n'est pas un pléonasme, « insister avec légèreté » n'est pas un oxymore.

UN CORPS COMPRENANT UN ORGANE DE LA VÉRITÉ ?

Comprendre est un acte dynamique, personnel, transitoire : je fais mienne petit à petit telle ou telle conception, et ma compréhension est susceptible d'évoluer à mesure que des éléments nouveaux pour moi viennent la nourrir.

Une vérité est une assertion statique, impersonnelle, définitive : elle vaut pour tous et pour toujours (fût-elle très circonstancielle : si j'ai mal aux dents aujourd'hui, il sera vrai à jamais et pour tous que j'ai eu mal aux dents aujourd'hui).



Nous sommes armés pour comprendre, mais n'avons pas d'organe spécialisé dans la perception de la vérité. Ce serait concevable, pourtant. Nos sens n'épuisent pas toutes les possibilités : certains animaux perçoivent le magnétisme terrestre. Alors, pourquoi n'aurions-nous pas un organe doté d'une sensibilité spécifique à la vérité ? Il nous mettrait en prise directe avec elle, sans que nous ayons à passer par le détour de la compréhension. Une vérité se manifesterait en tant que telle à cet organe avec la même évidence qu'une lumière à nos yeux ou un son à nos oreilles, et pourrait nous procurer du plaisir, comme le font une peinture ou une musique.

Dépourvus d'un tel organe, nous éprouvons du plaisir non dans la vérité, mais dans la compréhension. Or notre cerveau, d'une puissance incontrôlable, est capable de trouver du sens à des calembredaines, et de les comprendre. Du coup, nous sommes soumis à la tentation permanente de préférer une théorie fausse plaisante à comprendre plutôt qu'une théorie moins fausse, mais moins plaisante.

MÉTÉOROLOGIE FRANGLAISE

Une tournure classique, en anglais, pour désigner un temps lourd est *close weather* – mot à mot, « temps proche ». Lourdeur, proximité, sont des images voisines. L'une et l'autre expriment que le temps est oppressant : on a du mal à ne pas se laisser envahir par la sensation qu'il provoque.

Le mot lourd n'est pas inconnu des Anglais en tant que terme météorologique. Ce que les Français appellent forte averse, ils l'appellent *heavy shower*. Les images de force et de lourdeur expriment, là encore, des perceptions voisines.

Les termes anglais n'ont rien pour troubler un Français : il voit très bien quelles images expliquent leur emploi. Pourtant si je soupire : « Le temps est proche, aujourd'hui » ou si je m'exclame : « J'ai échappé à une lourde averse », on me regardera avec des yeux ronds. Ces deux expressions parfaitement compréhensibles sont incompréhensibles.



OBJET, ÉTUDE, OBJET D'ÉTUDE

Napoléon a fait l'histoire. Michelet a fait de l'histoire. Dans la première phrase, le mot histoire désigne un objet ; dans la seconde, l'étude de cet objet. Ainsi, l'histoire est l'étude de l'histoire !



Les ambivalences analogues sont nombreuses. Dire : « L'économie de tel pays plonge », « Sur route, on a le droit de rouler à 90 km/h », « La géologie de telle région est tourmentée », réfère à des objets. Dire : « L'économie est une science », « J'apprends le droit », « La géologie est peu mathématisée », réfère à des études. Par contre, la biologie est une étude, pas un objet.

Champion de l'ambivalence, le mot psychologie peut désigner la tournure d'esprit de l'homme en général, celle d'un homme en particulier, ainsi que l'étude de celles-ci. Il peut aussi désigner la tournure d'esprit d'une espèce animale, d'un membre de cette espèce, ainsi que l'étude de celles-ci.

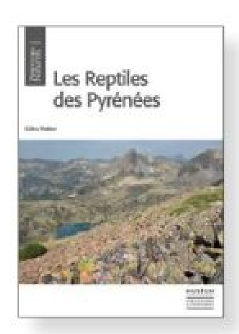
Le mot physique est retors. Le physique est un objet, la physique une étude. Quant aux mathématiques et à la philosophie, elles se rejoignent, une fois de plus. Les deux mots désignent des études, pas des objets. Et la nature des objets auxquels elles se consacrent est un problème aussi vieux qu'elles. ■

Imprimé en France – Maury Imprimeur S.A. Malesherbes – Dépôt légal 5636 – Juillet 2016 – N° d'édition M0770465-01 – Commission paritaire n° 0917 K 82079 – Distribution : Presstalis – ISSN 0 153-4092 – N° d'imprimeur 209 833 – Directrice de la publication et Gérante : Sylvie Marcé.

MUSÉUM
NATIONAL D'HISTOIRE NATURELLE

.... biodiversité - reptiles ....





LES REPTILES DES PYRÉNÉES

Gilles **Pottier**

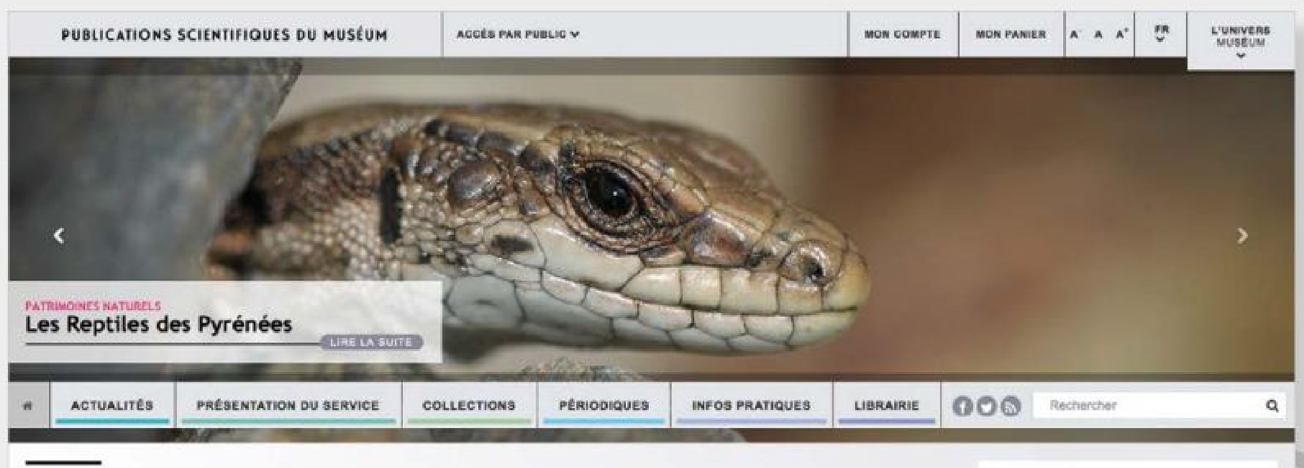
Préface de Juan Pablo **Martínez Rica**

Cette faune herpétologique des Pyrénées est le résultat d'une entreprise naturaliste combinant enquête bibliographique et reportage photographique. Elle propose une vaste synthèse de données relatives à de multiples champs disciplinaires (systématique, taxinomie, biologie, écologie, éthologie, phénologie...) concernant 32 espèces protégées, jusque-là dispersées sur une multitude de supports et concernant les deux versants de la chaîne (Espagne, Andorre et France). Elle offre par ailleurs une iconographie totalement originale, ne figurant que des individus et des habitats photographiés dans les Pyrénées. Ceci pour illustrer au mieux les variations phénotypiques propres à l'aire géographique concernée et les particularités écologiques des reptiles pyrénéens. Des cartes de répartition précises (mailles UTM 10 km × 10 km), reposant sur des sources scientifiques, complètent et éclairent le propos biogéographique. Les espèces et sous-espèces endémiques ou subendémiques de la chaîne, de même que celles qui y ont un statut particulier (très localisées, menacées...), ont fait l'objet d'une attention particulière et les menaces qui pèsent sur ces animaux sont largement exposées.

Cet ouvrage sera précieux pour les naturalistes et gestionnaires d'espaces naturels de la chaîne (parc national, PNR, Natura 2000, réserves...), qui disposeront là d'une mine d'informations sur le sujet.

Collection **Patrimoines naturels**, tome 73 | 210 × 297 mm relié | Texte en français | 352 p., 540 figures coul. | **ISBN** 978-2-85653-786-2 | **Prix** 43 € TTC (40,76 HT) | Juin 2016

plus de renseignements et de contenus sur la librairie en ligne des Publications scientifiques







Commandez vos ouvrages depuis le **monde entier** sans intermédiaire. Navigation transversale par **Moteur de recherche**, **Thèmes** et **Géozones**.

Téléchargez gratuitement les articles des revues *Geodiversitas*, *Zoosystema* et *Adansonia* (publiés depuis 2000). D'autres revues sont consultables ou référencées...

Composez votre propre sélection en éditant un **catalogue** personnalisé au format PDF (A4).



